

東京都市大学
博士学位論文

**住宅における環境調整行動モデルの開発と
熱負荷シミュレーションへの導入に関する研究**

今川 光
東京都市大学大学院環境情報学研究科
学籍番号 1893102

指導教員 リジャル ホム バハドゥル 教授

2021 年 3 月

論文要旨(和文)

(2,000字程度)

報告番号	甲第	号	氏名	今川 光
論文主題	住宅における環境調整行動モデルの開発と熱負荷シミュレーションへの導入に関する研究			

(論文要旨)

室外気候変動に対して、人々は様々な環境調整行動を行なって、その地域や季節に適応をしている。環境調整行動に関する研究は様々挙げられるがその一つに、温熱環境を説明変数として環境調整行動の頻度や状態との対応関係を数式で表現する、環境調整行動モデルがある。これは国内外で様々な行動を対象に研究がなされている。

従来の環境調整行動モデルは各々の環境調整行動ごとにモデル化がなされている。しかし、エアコン使用時には運転効率の観点から窓を閉鎖することを考慮すると、環境調整行動選択は相互関係を持つことが考えられる。また、従来では環境調整行動の実行時の熱的快適性まで考慮したモデルはみられないため、従来にない環境調整行動モデルを開発することにより、実態に近い環境調整行動の解明への寄与が考えられる。

また、既往研究では建築熱負荷シミュレーションの居住者行動設定に環境調整行動モデルを利用することがあるため、新たに開発した環境調整行動モデルを導入することで、予測精度の高いシミュレーション実行に寄与できることが見込まれる。

以上の研究背景から、フィールド調査のデータを用いて環境調整行動モデルの開発を行ない、居住者行動の実態解明を行う。また、開発された環境調整行動モデルによる建築熱負荷シミュレーションの精度向上の可能性を検討する。本調査は2010~2014年に関東地域の住宅の計120世帯で実施した。10分毎の室内温湿度測定と、アンケート用紙を用いた居住者熱的快適性および環境調整行動状態の申告調査を同時実施し、計36154ケースの申告データを収集した。

エアコン使用と窓開閉の相互関係を基に、窓とエアコン冷暖房のモデル統合を行った。得られた統合モデルから、外気温度が23.6℃の時に最高窓開放割合は0.52となった。また、外気温度が28.9℃では窓開放とエアコン冷房使用の割合が同等となり、28.9℃より低いと窓開放の方が、28.9℃より高いとエアコン冷房使用の方が割合が高いことが明らかとなった。さらに、扇風機は単独使用よりも窓開放やエアコン冷房と併用する頻度の方が多いため明らかとなった。これらの知見から窓開閉・エアコン冷暖房・扇風機使用の行動をひとつの図中で表現できる統合モデルが開発できた。

年間変動を取り扱う環境調整行動モデルでは春と秋の外気温度帯は同等であるが、「冬から気温上昇する春」と「夏から気温低下する秋」では居住者の体感とそれに応じた環境調整行動の選択傾向は異なると考えられる。そこで、季節に応じた環境調整行動の実態を解明し、環境調整行動モデルへの含有の必要性を検討した。各季節で窓・エアコン冷暖房モデルを比較したところ、エアコン暖房は春季の方が多く、エアコン冷房は秋季の方が多いため傾向であった。

環境調整行動状態と同時に申告された熱的快適性を用いて、過度なエアコン使用のモデル化を行った。得られたモデルから、過度な暖房使用は1%未満、過度なエアコン冷房使用は4%に達することが分かった。

開発した窓・エアコン統合モデルから、外気温が20.7℃以下で窓閉鎖、20.8~28.8℃で窓開放、28.9℃以上でエアコン冷房使用となる制御設定が考案できた。この設定を1時間毎の外気温に適用すると、各月に応じた窓開放とエアコン冷房の切り替え制御が得られたと同時に、春・秋の行動選択性の重要性が示唆された。

以上のことから、環境調整行動モデルを新たに開発したことで、居住者行動の解明に寄与でき、室内温度やエネルギー使用の予測に寄与できることを明らかにした。

(注意) 論文主題が外国語の場合は、日本語の訳文を()を付して記入すること。

論文要旨 (英文)

(500 語程度)

報告番号	甲第	号	氏名	Hikaru IMAGAWA
論文主題	Development of the occupants' behaviour stochastic models and its implementation in the building thermal simulation			

(論文要旨)

The residents conduct the various occupants' behaviours for adaptive thermal comfort depended on variation of indoor and outdoor thermal environment. There are many studies about occupant behaviour around the world which showed the relationship between occupant behaviour and thermal environment as occupants' behaviour stochastic model.

Occupants' behaviour stochastic model in the previous studies is calculated by each behaviour. However, all of the occupants' behaviours may be related to each other. For example in Japanese dwellings, we often close the window when turn on air-conditioner. In addition, occupants' behaviour model in previous study did not include the residents' thermal comfort. It is important to consider the thermal comfort in occupants' behaviour model to clarify the comfortable thermal environment and energy saving. Improvement of occupants' behaviour model is also useful for understanding the realistic occupants behaviour. This may lead to higher accuracy of prediction in building thermal simulation.

The objectives of this study are as follows.

- 1) To develop the occupants' behaviour stochastic model considering with residents' thermal comfort and relationship of each occupants' behaviour.
- 2) To clarify the residents' occupants behaviours in the dwellings of Kanto area.
- 3) To simulate the occupants' behaviour in Japanese dwellings based on outdoor air temperature using developed occupants' behaviour models.

This field surveys were conducted in 120 dwellings during a for-year periods in Japanese dwellings of Kanto region. From this survey, 36,114 responses were collected.

The window open/closed, air conditioner and fan use stochastic model were integrated in one model explained by outdoor air temperature. This integrated model showed the amount of opportunities for each behaviour by relative proportion. When the outdoor air temperature is 23.6°C, the proportion of window open is 0.52 as maximum value. When the outdoor air temperature is 28.9°C, the proportions of window open and cooling use is same. When the outdoor air temperature decreased from 28.9°C, the proportion of window open is higher than cooling use, and vice versa. The proportion of single fan use is lower than the combined fan use with window open or cooling use, and thus the residents in Kanto region often use fan as combination with window open or cooling use.

We have also analysed about seasonal transition pattern of occupants behaviours for considering the models. The proportion of cooling use in autumn is higher than in spring, and the proportion of heating use in spring is higher than in autumn. The relationship between each proportion of window open, fan, cooling and heating use and monthly mean outdoor air temperature during the voting. There is larger difference of proportion of window open and cooling use between when the outdoor air temperature increasing or decreasing. The cooling use model was calculated for the periods when the outdoor air temperature increases or decreases.

The cooling and heating use model were calculated considering with the residents' thermal sensation vote. These models showed that the proportion of excessive cooling use reach about 0.04 in summer.

The window open/closed and cooling use behaviour for one hour interval is simulated using developed model and measured outdoor air temperature in the meteorological station. The behaviour change was found in nighttime, and thus the time-wise control might be important for the realistic behaviour simulation.

From this study, the occupants behaviour stochastic model was developed to clarify the residents' behaviours in Japanese dwellings, and we have tested the occupant' behaviours simulation using developed model based on hourly outdoor air temperature.

(論文要旨)

論文目録

東京都市大学

報告番号	甲第	号	氏名	今川 光
論文				1 冊
主 題				
住宅における環境調整行動モデルの開発と熱負荷シミュレーションへの導入に関する研究				
参考論文				0 冊
題 名				

備考 論文の主題が外国語の場合は、日本語で訳文を（ ）を付して記入すること。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	2
1.2	本研究の目的	12
1.3	本論文の構成	12
第2章	研究方法	13
2.1	本章の概要	14
2.2	本研究の概要	14
2.3	フィールド調査の概要	14
2.4	データ整理と統計解析	19
2.5	本研究における環境調整行動モデルの定義と適用範囲	20
2.6	想定する建築熱負荷シミュレーション	21
2.7	分析データの傾向	21
第3章	相互関係性に基づいた統合的環境調整行動モデルの開発	27
3.1	本章の概要	28
3.2	環境調整行動モデルの統合の意義	28
3.3	窓開閉行動とエアコン冷暖房使用のモデルの統合	29
3.4	窓開閉/エアコン冷暖房使用統合モデルへの扇風機使用の統合	39
3.5	その他の環境調整行動要素の傾向の把握	53
3.6	まとめ	63
第4章	季節遷移を考慮した環境調整行動モデルの検討	65
4.1	本章の概要	66
4.2	季節変動を考慮した環境調整行動モデルの概念	66
4.3	各季節ごとの環境調整行動モデルの算出	67
4.4	各月ごとの環境調整行動モデルの算出	69
4.5	FRモードにおける各月の寒暑感と室内気温の関係	70
4.6	各月の快適温度と日移動平均外気温の関係	71
4.7	各月の環境調整行動割合と申告時の外気温平均の関係	72
4.8	各月の寒暑感と気温の関係	74
4.9	各月の快適温度と外気温の関係	75
4.10	外気温変動の指向性に基づいた環境調整行動モデルの算出	76
4.11	まとめ	77
第5章	熱的快適性を考慮した環境調整行動モデルの算出	79
5.1	本章の概要	80
5.2	熱的快適性を対応付けた環境調整行動モデルの開発の意義	80
5.3	過度なエアコン冷房使用モデルの算出	81
5.4	過度なエアコン暖房使用モデルの算出	84

5.5	まとめ	88
第6章	環境調整行動モデルを用いた居住者行動の再現の試行	91
6.1	はじめに	92
6.2	ESP-r 導入のための手法の検討	92
6.3	環境調整行動割合の大小関係を用いた窓開閉と エアコン冷房の制御に関する外気温閾値の設定	92
6.4	最大環境調整行動割合を利用した窓開閉と エアコン冷暖房の制御に関する外気温閾値の設定	94
6.5	外気温変動に対する窓開閉とエアコン冷房の制御結果	95
6.6	まとめ	101
第7章	総括	103
7.1	本研究の結論	104
7.2	本研究の成果に対する制限	106
7.3	今後の展望	106
	参考文献	108
	業績リスト	114
	謝辞	117

第 1 章 序論

1.1 はじめに

私たち人間は日々の生活の中で無意識的、もしくは意識的に「寒暑涼暖」を感じながら生活を行なっている。各々の地域の気候特性は、地球の公転と地軸の傾き、緯度と経度などによって決定され、それが季節変動として私たちの生活と関わってくる。その大きな季節変動の中においても、人々はその季節変動に応じた快適性を得て過ごしている。これを「**適応 (Adaptation)**」もしくは「**適応的快適 (Adaptive comfort)**」と呼ぶ。ではなぜ、大きな季節変動に応じた適応的快適性を得ることができるのか。その背景には「3つの適応」が働くためと言われている。これは「**生理的適応**」「**心理的適応**」「**行動的適応**」である。

この3つの適応について、具体例を挙げる。生理的適応には血管収縮・拡張による人体末端部の放熱量の調整や発汗などが挙げられる。人間が生きていく上で必要なこと、例えば心臓などの内臓や手足を動かすにはエネルギー使用するがその時の生成熱は排熱する必要がある。この排熱の速度をより速く行うには発汗は有用である。心理的適応には緑や風鈴などの使用が挙げられるだろう。そして、行動的適応には人々自身の「行動」として行う適応である。これには、場所移動や着衣調整といったものから空調機器の使用というように、様々な手段が挙げられる。

環境調整行動^{注釈 1)}の一側面である「空調機器」について、空調機器の運転効率や運転性能の向上に取り組んできた。その一方で、普及率の上昇に応じて省エネルギー問題や節約観点など、空調機器の使い方の課題も現れてきた。そのことを踏まえ、国内外を含めて様々な地域で環境調整行動の研究が行われてきた。これらの研究の一つに、室内外気温などの温熱環境物理値を説明変数として、環境調整行動の頻度・状態との対応関係を数式で表す、**環境調整行動モデル**が挙げられる。

これまでの環境調整行動モデルの研究は、各々の環境調整行動ごとに算出をされている。しかし、「エアコン冷暖房使用時には、運転効率の観点から窓は閉鎖する」ことが一般的で

注釈 1) 「環境」という言葉は様々な場面で使用されており、専門分野によって異なる意味を連想することが考えられる。

「環境」という単語を辞書で調べると、次のような記述が抜粋できた。

文献[1]: めぐり囲む区域。四囲の外界。周囲の事物。特に、人間または生物をとりまき、それと相互作用を及ぼし合うものとして見た外界。自然的環境と社会的環境がある。文献[2]: 人間ととりまく、自然・社会・家庭の状態。まわり。文献[3]: まわりを取り巻く周囲の状態や世界。人間あるいは生物を取り囲み、相互に関係しあって、直接・間接に影響を与える外界。文献[4]: 取り囲んでいる周りの世界。人間や生物の周囲にあつて、意識や行動の面でそれらと何らかの相互作用を及ぼし合うもの。また、その外界の状態。自然環境の他に社会的、文化的な環境もある。周囲の境界。まわり。

また、本学環境情報学研究科においても、建築環境だけでなく自然環境・人間環境・社会環境...というように様々な視点から「環境」を研究しており、読者によって想像する「環境」は異なる可能性がある。

そこで本研究では、「居住者の身体の周辺」を「**環境**」と定義し、それらの物理環境を調整する行動のことを「**環境調整行動**」と定義する。例えば、窓開閉やエアコン冷暖房・扇風機の使用だけでなく、着衣調整も環境調整行動となる。

ある。これはつまり、居住者の環境調整行動の選択・判断は互いに影響しあう、つまり相互関係があることを意味する。また、これまでの環境調整行動モデルはその時の行動状態のみを表現しているが、その環境調整行動を実施した上での居住者自身の快適性を表現していない。実施された環境調整行動に対する熱的快適性も表現をすることができれば、居住者たちがどれくらい上手に生活をしているのか？にまで解明できることが見込まれる。

以上のことから、環境調整行動モデルの表現方法を開発することで、より生活実態に即したモデルを算出したり、従来では検討できなかった新たな知見を解明できることが見込まれる。また、先行研究では環境調整行動モデルを建築熱負荷シミュレーションにおける居住者行動設定へ導入することで、室内気温やエネルギー使用量の予測精度の向上を試みる事例が挙げられる。そこで、前述の開発された環境調整行動を建築熱負荷シミュレーションへ導入することで、先行研究よりも予測精度の高いシミュレーションを行い、適切な環境調整行動実施のための知見が得られることが見込まれる。

1.1.1 適応的な熱的快適性と環境調整行動について

熱的快適性の指標の一つとして Fanger の PMV (予測平均快適感申告) がある。これは、ある空間に滞在すると仮定した人間の熱的快適性がどうであるのか？を温熱環境 6 要素から計算式で求める熱的快適性モデルのひとつである。その環境の熱的快適性評価を行う時によく使われる指標であり、温熱物理値による計算のみを用いたものである。

その一方で、各々の地域や季節ごとに快適と感じる温度は異なることが言われている。これを説明した研究の一つが、Humphreys ら [5][6] が提唱した適応モデルである。適応モデルとは各地域の中立温度と外気温をプロットすると、その外気温値に応じて中立温度も異なっていた、というものである。適応モデルは現在でも国内外で研究がなされており、ASHRAE Standard 55 [7] や CEN [8]、CIBSE Guide [9] などの建築温熱環境基準の採用にも至っている。

ではなぜ、各地域の気候変動に応じて、熱的快適性は異なるのか？これに対し、前述の Humphreys は「生理的適応」「心理的適応」「行動的適応」の3つの適応が働くためであると述べている [10]。生理的適応とは血管収縮・拡張による血流量の調整と発汗などが挙げられる。生理的適応は身体内の反応であるため、無意識のうちに適応していることが一般的である。「心理的適応」とは植物や風鈴などを設置し、心理的に快適になる手段である。そして「行動的適応」とは、着衣調整や窓開閉、空調機器の使用など、居住者自身の自発的な行動によって温熱環境を調整しようとする適応手段である。Humphreys [10] は、中枢神経系を通過する自律制御適応システムの一部として生理的・行動的適応のどちらもフィードバックループに構成されることを述べている。斉藤ら [11] は、ヒトの周辺環境からの熱的刺激と人体内での情報伝達プロセスについてまとめており、生理的および心理的・行動的な適応がそれぞれ連なることを説明している。

これら3つの適応には、各々の地域差があることが考えられる。例えば、辻田ら [12] は関

西の大学に所属する沖縄出身の学生を、沖縄へ帰省する前後で比較したところ、帰省後の汗量の方が多く、汗量あたりの塩分濃度は減少していたことが分かった。松本ら[13]は日本人とタイ人の発汗傾向が異なることを実験で明らかにしている。さらに Gautam ら[14]は幅広い気候帯を持つネパール国内での調査において、同じ室内グローブ温度であっても亜熱帯地域で育った現地住民より寒帯から亜熱帯に移住してきた住民の方が発汗を感じる機会が多いことを明らかにしている。心理的適応についても、・価値観に依存するだろう。例えば風鈴の音色に対して快適と感じるか、うるさく感じるかどうかは地域ごとに異なることが考えられる。行動的適応についても、各地域の気候特性だけでなく文化や経済性とも関係するだろう。

以上のことを踏まえると、人々の適応的な熱的快適性と環境調整行動は各々の地域ごとに研究することが重要であると考えられる。

1.1.2 環境調整行動の種類と日本における実態

環境調整行動には、電力などのエネルギーを運用時に使用する行動と、運用時は自然エネルギーの利用に基づく行動に分類できる。環境調整行動の歴史を辿ると、前者・後者のどちらも存在していた。小原ら[15]は環境調整行動と空調設備の歴史について、次のように紹介している。原始時代には太陽や火から暖を取っていたが、約2000年前からはカラカラ大浴場の暖房装置のように、空調装置の利用による環境調整が取り入れられている[15]。また、西暦1500年頃には換気のためにレオナルド・ダ・ヴィンチが水車を動力にした扇風機を考案したり、インドでは天井から吊るされた大扇を動かす「パンカ (Punka)」が記録に残っている[15]。さらに冷房についても、屋根裏に氷の塊を設置し団扇で冷気を送る手法や二重壁の間に雪を敷き詰める手法があったが、誰でも実施できる手法ではなかった[15]。

これら暖・冷の元を辿ると、炎を用いた手法は木材や炭などの可燃物を利用する手法と、それ以外の手法は自然エネルギーを利用した手法が多い。これらの方で、現代では扇風機やエアコンディショナー・電気ヒーターなど、電力を使用して運転させる空調設備も多くの地域で使用されている。

日本の現代の住宅においても様々な環境調整行動が実施できる。着衣調整は人々にとって最も身近で重要な環境調整行動の一つであるが、その他にも、エアコンによる冷暖房や扇風機、こたつ、ヒーター・床暖房など、様々な温熱環境調整家電がある。

ここで、参考文献[16]より得られた一般家庭におけるエアコンの普及率を Figure 1.2 に、100世帯あたりの保有台数を Figure 1.2 にまとめた。普及率をみると1980年には全国的にも50%しかエアコンは普及していなかったが、2003年頃を目処に全国的な普及率は90%に達していることから、エアコンは日本のほとんどの住宅に普及したことがわかる。また、100世帯あたりの保有率をみても明らかにように、1990年度には既に100台を超えており、1997年には1世帯あたり2台を所有していた傾向がみられた。世帯保有台数は2003年度まで上昇傾向を示し、およそ2012年度には1世帯あたり約3台を所有する傾向であった。

次に扇風機を確認すると、先行研究[17]にて1979年で既に95%以上の普及率に達しており、エアコンよりも早く普及していることがわかる。以上のことから、環境調整行動の家電としてはエアコンや扇風機がよく普及しており、日本における主要な行動選択肢として考えられることがわかる。

これらの温熱環境調整家電が普及する一方で、エネルギー使用量を削減する必要性があることから、エアコン使用によるエネルギー使用を削減しようとする取り組みも行われている。日本においては環境省が提唱する「クールビズ」[18]および「ウォームビズ」[19]が挙げられる。クールビズとは、着衣調整などといった運用時にエネルギーを使用しない工夫を積極的に取り入れることで、エアコン冷房使用によるエネルギー使用量を減らそうとする取り組みである。それに加えて冬季のエアコン暖房使用時にも着衣調整などで代替する取り組みがウォームビズである。これらの取り組みにおいてはエアコン冷房使用時の室温が28℃、暖房使用時では20℃という基準値が設定されている[18][19]。それを実現するためにクールビズにおいては、着衣の軽装化や省エネエアコンへの買替え、西日よけのブラインド、日射を遮るグリーンカーテンなどの工夫も挙げられている。着衣の軽装化について、日本の住宅内では外出先と比較して衣服選択の許容範囲が広いと考えられる一方で、オフィス空間などでは着衣が統一的にされる傾向があった。そのため、環境省ではクールビズに取り組む時の服装基準を示しており、ノーネクタイや半袖シャツなどを着用して執務することを可能としている[20]。

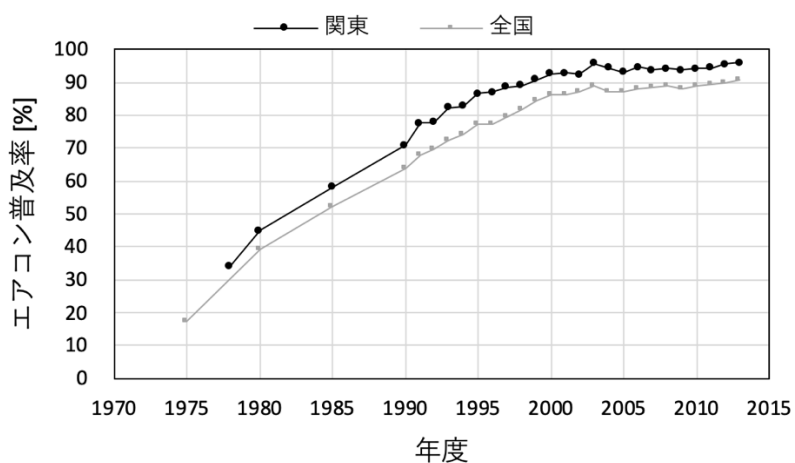


Figure 1.1 Spread of air-conditioner in Japanese houses.

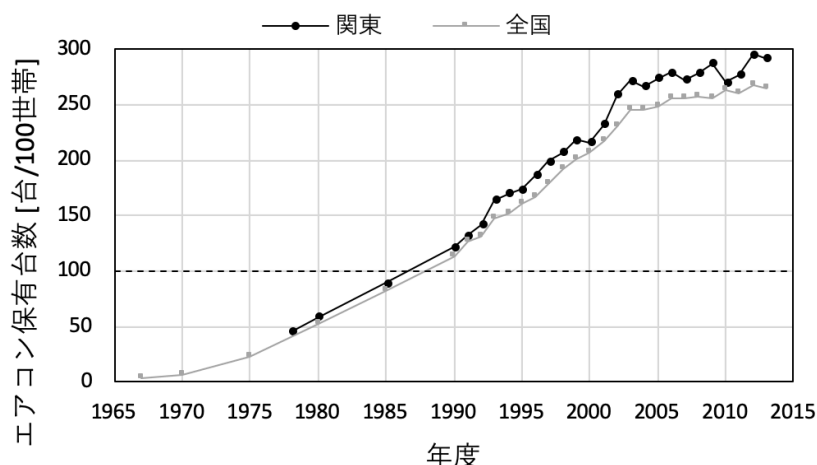


Figure 1.2 Number of air-conditioner in Japanese houses.

1.1.3 環境調整行動モデルと先行研究

環境調整行動に関する研究は様々挙げられるがその一つに、温熱環境を説明変数として環境調整行動の頻度や状態との対応関係を数式で表現する、環境調整行動モデルがある。環境調整行動モデルの研究はこれまでも世界中で数多く行われている。表 1-1 に環境調整行動モデルの先行研究をまとめた。先行研究でよく取り扱われているものには窓開閉やエアコン冷暖房使用、着衣量が挙げられる。

環境調整行動を気温変動から説明しようとした研究の先駆的事例としては、Humphreys による英国の布団の枚数と寝室温度の関係性[21][22]が挙げられる。この研究では寝室温度が上昇する程、布団の枚数が減少していく他、毛布の方が羽布団よりも 3 倍以上の枚数をかけていることや、寝室温度が 21°C 以上では羽布団は使用されなかったことなど、寝室における居住者行動を定量的に解明している。多くの先行研究では、一つの論文に対して着衣量のみ、窓開閉のみ、エアコン使用のみというように、単一の行動のみに焦点を当てて研究を進めている事例がある一方で、Raja ら[23]や Kim ら[24]、Takasu ら [25]、KC ら[26]のように、一つの調査で複数種類の環境調整行動のモデル化に取り組んだ先行研究も挙げられる。多くの地域において、複数の環境調整行動が選択肢として挙げられることを考えると、複数の環境調整行動を同時に解明することは重要であると考えられる。

日本における初期の環境調整行動モデルの研究例は、澤地ら[27]の住宅におけるエアコン冷暖房使用が挙げられる。この研究では、エアコン冷房とエアコン暖房に加えてこたつの使用生起率を、説明変数に室温を用いて一次関数でモデル化している。他にも、真島ら[28]は、京都の住宅における窓開放行動を、住宅前の道路幅ごとに算出している。

表 1-1 環境調整行動モデルの先行研究例

著者	地域	モデル化された行動	部屋
(27)澤地ら (1987)	千葉・東京・神奈川	Cooling, heating & kotatsu	集合住宅
(29)岩下ら(1997)	鹿児島	Cooling & window	集合住宅
(30)Nicol et al. (1999)	Pakistan	Window, fan, heater, number of garments & clothing insulation	Office
(23)Raja et al. (2001)	Oxford & Aberdeen	Door, window, fan, blind/curtain & lights	Office
(31)仲松ら (2003)	沖縄	Clothing insulation	屋外
(32) [33]羽原ら (2004)	大阪	Cooling & heating	居間
(34)猪股ら(2006)	仙台・つくば・横浜	Clothing insulation	Office
(35)DeCarli et al. (2007)	Singapore & Indonesia	Clothing insulation	Office & residential building
(28)真島ら (2007)	京都	Window	住宅
(36)Rijal et al. (2008)	Oxford, Aberdeen	Window	Office
(37)Haldi & Robinson (2009)	Lausanne (Switzerland)	Window	Office
(38)谷本・萩島 (2009)	福岡都市圏	Cooling	住宅
(39)Schweiker et al. (2009)	Tokyo	Cooling & Heating	Dormitory room
(40)Rijal et al. (2011)	EU, Pakistan	Window	-
(41)Schweiker et al. (2012)	Tokyo, Switzerland	Window	Building
(42)Andersen et al. (2013)	Denmark	Window	Apartment, House
(43)Rijal et al. (2013)	Gifu (Japan)	Window	Living room
(44)高瀬ら(2015)	関東地方	Window & fan	Office
(45)Schakib-Ekbatan et al. (2015)	Frankfurt (Germany)	Window	Office
(46)Nam et al. (2015)	Korea	Clothing insulation	Preschool
(47)Li et al. (2015)	Chongqing (China)	Window	Office
(48)Rijal et al. (2015)	Kanto	Window & fan	Living, Bed
(49)Singh et al. (2017)	Tezpur & Shillong (North-East India)	Clothing insulation, window, fan	Office
(50)Stazi et al. (2017)	Italy	Window	Classroom
(24)Kim et al. (2017)	Australia	Window, cooling, heating & fan	-
(51)Jiao et al. (2017)	Shanghai	Clothing insulation	Elderly care center
(25)Takasu et al. (2017)	Tokyo, Kanagawa	Window, cooling, heating & clothing insulation	Office
(52)Pan et al. (2018)	China	Window	Office
(53)Liu et al. (2018)	Changsha (China)	Clothing insulation	Office

表 1-1 続き

著者	地域	モデル化された行動	部屋
(54)Xu et al. (2018)	Nanjing	Clothing insulation & heating, hot water bottle	Traditional dwelling
(26)KC et al. (2018)	Tokyo	Window, cooling, heating, fan & clothing insulation	HEMS Condominium
(55)Rijal (2018)	Nepal	Clothing insulation	Traditional dwelling
(56)Kumar et al. (2019)	India	Clothing insulation, fan	Hostel building
(57)新谷ら (2019)	東京・神奈川	Clothing insulation	Office
(58)Rijal et al. (2019)	Japan	Clothing insulation, cooling & heating	Office
(59)Gautam et al. (2019)	Nepal	Clothing insulation	Traditional dwelling
(60)Nakagawa et al. (2020)	Nagano	Clothing insulation	Classroom in high school
(61)Du et al. (2020)	Chongqing (China)	Window	High-rise buildings for residents

1.1.4 環境調整行動モデルの研究発展性

環境調整行動の先行研究を見てみると、一部の窓開放モデルを除いて、その全てが各々の環境調整行動のみでモデル化している。また、これまでの環境調整行動は行動自体の状態をモデル化しているが、その時の居住者の快適性については考慮ができていない。

環境調整行動について、複数の選択肢が挙げられる日本の住宅においては、一方の環境調整行動選択が他方の環境調整行動選択に影響を与える可能性が考えられる。例えば、エアコンの運転効率に重要な要素のひとつに室内の気密性が挙げられる。高气密にすることでエアコンによって調整された空気を建物外へ逃さないようにするが、これは排熱を促す窓開放とは相反している。そのため、一般的な住宅においてはエアコン冷暖房使用時には窓は閉鎖することが多い。これはつまりエアコン冷暖房使用状態が窓開閉状態の選択に影響を与えていることを意味する。このような相互関係性を用いて、Rijal ら[43]の先行研究のように窓開放の頻度を外気温および室内気温を説明変数にしたモデルの算出において、エアコン冷暖房不使用時(FR モードと呼んでいる)のみを対象にして算出した事例が挙げられる。しかし、このような相互関係を反映した環境調整行動モデルの先行研究例は他に見当たらない。

また、日本の住宅における環境調整行動は扇風機やヒーターの使用、着衣調整なども挙げられるが、これらの環境調整行動の選択性もその他の環境調整行動状態から影響を受けることは十分考えられる。例えば、扇風機はモーターの動力を用いて室内空気の対流を強める機器であるが、これは窓開放時のような気密性の低下が伴わないため、エアコン冷房

と併用できる空調設備である。先行研究をみてみても、例えば坪田ら[62]は関東と山梨の住宅における夏季の「涼のとり方」の頻度の割合を外気温 2℃ごとに算出をしているが、エアコンや扇風機、窓開放は単独で実施するケースだけでなく併用するケースも含めて算出している。しかし、この先行研究は回帰式による環境調整行動モデルの算出までは至っていない。

以上を考慮すると、環境調整行動モデルから実態をより明確に解明するためには、環境調整行動ごとに算出するだけでなく、各々の環境調整行動の選択における相互関係性を考慮して算出を行うことが重要であると考えられる。これは、様々な環境調整行動を選択できる日本の住宅の研究において、年間変動を対象とする場合に含有すべき重要な要素と考えられる。

また、従来の環境調整行動モデルは、環境調整行動の状態と温熱環境物理値の対応関係をそのまま検討しているため、行動状態を表現しているに過ぎない。そのため、環境調整行動の実施の結果としての快・不快にまでは表現するに至っていない。例えば三菱電機ビルテクノサービスのリリース[63]によると、オフィスに努める 20~60 代の男女 1000 人を対象にした調査において、女性の 60%および男性の 36.2%はオフィスの冷房設定温度を寒いと感じている結果が得られている。これは複数の執務者が同じ空間を共有する「オフィス」における個人差による課題であるが、環境調整行動は上手に運用しないと熱的不快は避けられないことがわかる。また、住宅におけるフィールド調査の先行研究 [64]-[66]から熱的快適性申告の結果をみると、エアコン冷房使用時であるにもかかわらず寒いと申告しているケースがみられた。住宅は個人の好みに応じた服装や設定温度選択の自由度が高いと考えられるにも関わらず、オフィスと同様にエアコン冷房による寒さを感じるケースがあったことが明らかである。これは、温熱環境の大きくそして緩やかな年間変動の中で、居住者たちは様々な環境調整行動を切り替えて、快適な温熱環境の構築をしようとしているが、必要以上の実施によって、必ずしも快適であるとは限らなかったことが考えられる。これらを考慮すると、従来の環境調整行動モデルでは行動実態を解明していたのに対して、環境調整行動モデルに熱的快適性を対応づけることで、環境調整行動の上手な使用や不適切な使用の定量化にまで至ることができると考えられる。このような、熱的快適性に応じた環境調整行動モデルを算出することができれば、より適切な居住者行動の解明に役立つことが考えられる。

以上のことから、環境調整行動モデルの研究は従来手法だけでなく、環境調整行動選択の相互関係性や熱的快適性も考慮した環境調整行動モデルを開発することで、様々な環境調整行動の選択肢がある日本の住宅の居住実態をより詳細に解明できるようになると考えられる。特に前述のクールビズなどでは、エアコン使用以外の環境調整行動も上手に併用することで、健康や快適性を損なわずに省エネルギーに取り組む必要があるため、複数の環境調整行動の選択性や熱的快適性を考慮した環境調整行動モデルは、住まい方や温熱環境構築の指針のための重要な資料となりうると考えられる。

1.1.5 環境調整行動モデルの利用実態と居住者行動設定の現状

環境調整行動モデルは、居住者の行動習慣特性を解明するために役立つ。例えば澤地ら[27]は、室内温熱環境の決定要因について、外界気候変動と建築熱特性だけでなく居住者の行動的要因も加味することで、より実態に即した室内気候の成り立ちを議論できると述べている。また、電力供給を情報技術を用いて管理するスマートグリッドでは、電力使用者の電力需要を予測することで、効率よく電力を供給することを目指している。この電力需要の予測において、外気温に基づく環境調整行動モデルを参考にすることで、屋外気候変動に基づいた電力需要の推測ができるだろう。

さらに、環境調整行動モデルは居住者行動の設定資料としても役立つ。例えば、建物と屋外気候の変動を設定することで室内温度やエネルギー使用量などを推定する建築熱負荷シミュレーションの研究では環境設備の制御設定に利用されている。これまでに建築において重要な環境設備である窓やドアの開閉やエアコン使用について、従来では時刻変動に応じて窓の開閉を設定する「スケジュール」の手法が取られることもあった。例えば、高田らは江戸町屋敷の建築温熱環境をシミュレーションして当時の温熱環境の知見を現代へ還元する試み[67]があり、ここでは当時の歴史資料のレビューを通して得られた居住者生活習慣スケジュールをシミュレーション設定に利用[68]している。一方で、熱的快適性に関する環境調整行動については、室内外の温熱物理環境値や熱的快適性に応じて変更されるため、必ずしもスケジュール通りに変更するとは限らない。

そこで、温熱環境物理数を説明変数とした環境調整行動モデルを熱負荷シミュレーションの居住者行動設定として利用することで、より現実的な行動設定でのシミュレーションができることが考えられている。この環境調整行動モデルの利用可能性については、いくつかの先行研究においても述べられている。例えば、DeCarliら[35]は、年間を通した動的な建築シミュレーションの利用が一般的となるにつれて、着衣量設定も一定値ではなく、季節に応じた着衣変化をシミュレートする標準的手法が必要となることを述べている。Andersenら[42]も環境調整行動の定量化による建築設備制御はシミュレーション結果の妥当性を向上できると述べている。Kimら[24]は建築性能シミュレーションの正当性の向上のための居住者と建物の相互関係が重要であり、オーストラリアの住宅における環境調整行動について時刻だけでなく外気温変動との対応関係についても分析している。Rijalら[69]は窓開閉習慣の現実的なデータは室内温熱環境シミュレーションの改善を助けることを述べている。また、実際に環境調整行動モデルを建築熱負荷シミュレーションへ導入した事例がいくつか挙げられる。例えば前述のRijalらの研究[36][40]では、英国とパキスタンのオフィスビルを対象にして、グローブ温度および外気温を説明変数とした窓開閉モデルを建築熱負荷シミュレーションで使用した例が挙げられる。また、羽原ら[32]は、時刻だけでなく気温変動も考慮した環境調整行動モデルを利用して、室内温度と冷房によるエネルギー使用をシミュレーションしている。谷本と萩島[38]は日本の住宅における夏日の室温を冷房使用モデルを用いてシミュレーションしている。Schweiker & Shukuya[70]は、居

住者行動モデルを用いて冷暖房使用時のエクセルギー消費パターンをシミュレーションしている。小玉ら[71]は建築熱負荷シミュレーションソフトウェア ESP-r にて、任意の外気温値を閾値として、窓開閉行動を制御する事例を紹介した。これらのことから、環境調整行動の状態を温熱環境から説明する環境調整行動モデルの研究は、建築熱負荷シミュレーションの行動設定のための重要な資料であることがわかる。

一方で、これらの先行研究では各々の行動ずつでモデル化された従来方式の環境調整モデルを導入する事例がみられるため、その他の環境調整行動との相互関係的な選択性は十分に考慮しているとはいえない。そのため、相互関係を考慮した環境調整行動モデルを開発し、建築熱負荷シミュレーションへ導入することができればより実態に近いシミュレーションを、年間を通して行える可能性がある。また、居住者の適応的な生活をシミュレーションする場合は、複数の環境調整行動を切り替えて行動制御する必要があるだろう。そこで、各々の環境調整行動の相互関係性を考慮した外気温ベースの環境調整行動モデルを建築熱負荷シミュレーションの行動設定へ導入することで、複数の環境調整行動を切り替えるような適応的な生活のための住宅環境を解明するのに役立つだろう。さらに、従来の環境調整行動モデルは行動実行時の熱的快適性を考慮できていない。そのため、熱的快適性を考慮した環境調整行動モデルも建築熱負荷シミュレーションへ導入することができれば、更なる省エネルギーの可能性を定量的に算出でき、省エネルギーと健康・快適性の両立した室内空間構築に貢献できるシミュレーションが実行できる可能性がある。

これらのような建築熱負荷シミュレーションは、**Building Information Modeling (BIM)**の一側面として利用される実態がある。**BIM**とは従来の図面や紙の資料に代わる、パソコン上で建築の意匠・構造・設備を忠実に再現したモデルのこと[72]であり、建築に関する設計や研究、教育などで広く利用されている。

さらに最近では、温熱環境物理測定値を実際の建築空調設備の制御に利用する例も見られる。例えば、株式会社 LIXIL では室内の温湿度と室外の温熱環境・天候・花粉・PM2.5をリアルタイム測定して、空調と窓を自動制御するシステムを本社ビルに設置し、省エネと快適性、知的生産性を追求した執務空間の構築を目指している[73]。また、ヒューリック株式会社の東京都のオフィスビルでは室内外気温のモニタリングを行い、冬季において室内気温よりも外気温の方が低い場合には中央熱源を停止させて外気温取り入れるように制御することで、省エネルギーを図っている[74]。これらのように、実際の空調設備の運用に、室内外の温熱環境に応じた制御を取り入れる事例があることから、温熱環境変動に応じた環境制御が、省エネルギーと健康・快適性の両観点から注目されており、環境調整行動モデルの研究もこれらの空調制御システムに貢献できることが考えられる。そのためには、新たに開発した環境調整行動モデルを建築熱負荷シミュレーションへどのように導入するのかを検討する必要がある。

1.2 本研究の目的

以上をふまえて、本研究では環境調整行動モデルについて、従来にはない新しい手法を開発することで、居住実態により近い環境調整行動の解明を行う。環境調整行動モデルの開発については、各々の環境調整行動の相互関係性を考慮した行動モデルや熱的快適性を対応づけた行動モデルの開発に焦点を当てる。

また、本研究で得られた環境調整行動モデルを用いて居住者行動を再現し、建築熱負荷シミュレーションの行動設定として導入することによって、シミュレーション精度の向上や新しい知見が得られるか、その可能性についても検証を行う。

本研究で行う環境調整行動モデルの開発は、居住者行動理解や表現に資する課題であり、建築熱負荷シミュレーションの行動設定の精度向上に寄与ができれば、省エネルギー性と快適性の両方に貢献できるような空間構成・居住アドバイスの提供を通して、社会貢献につながると考えられる。

1.3 本論文の構成

第1章では、本研究に関する背景と目的を述べた。論文の構成も説明した。

第2章では、本研究における研究方法を説明する。フィールド調査の方法、統計解析方法、環境調整行動の再現に関する検討手法について説明する。

第3章では、環境調整行動モデルの統合を行う。日本の住宅で一般的である窓開閉行動とエアコン冷暖房使用、扇風機使用に着目してモデル統合を行う。また、エアコン冷暖房の設定温度や着衣量についても、モデル統合の可能性を検証する。

第4章では、季節遷移を考慮した環境調整行動モデルの開発について検討を行う。

第5章では、居住者の熱的快適性を反映した環境調整行動モデルの開発を行う。電力を使用して運転するエアコン冷暖房は必要以上に使用してしまうことは、省エネルギーの観点から好ましくない。本章では、エアコン冷暖房使用モデルに居住者の熱的快適性を反映させることで、環境調整行動モデルを用いた省エネルギー評価の可能性を検討する。

第6章では、これまでに得られた分析を、建築熱負荷シミュレーションの居住者行動設定への反映手法を検討し、建築熱負荷シミュレーション研究の可能性を検証する。

第7章では、本研究で得られた成果、問題点、今後の展望についてまとめ、総括を行う。

第 2 章 研究方法

2.1 本章の概要

本章では、本研究における研究方法を説明する。

2.2 では、本研究における研究全体の流れを説明する。

2.3 では、統計解析に用いたデータを収集した、フィールド調査の概要を説明する。

2.4 では、前述のフィールド調査から得られたデータの構成と統計解析手法について説明する。

2.5 では、本研究で取り扱う建築熱負荷シミュレーションについて説明をする。

2.6 では、フィールド調査で得られたデータを用いて、室内外温熱環境や熱的快適性申告の分布を示し、調査対象データの概要を確認する。

2.2 本研究の概要

本研究は、住宅におけるフィールド調査の測定・申告データを用いた統計解析とコンピュータソフトウェアを用いた建築熱負荷シミュレーションの 2 ステップに分けられる。図 2.1 に本研究のプロセスを示す。

フィールド調査のプランニングでは、申告調査に用いるアンケート用紙の設計や測定項目の計画および準備を行う。調査を実施後に、測定データおよび申告データは PC 上へ取り入れ、データ整理を行った上で、統計解析を行った。

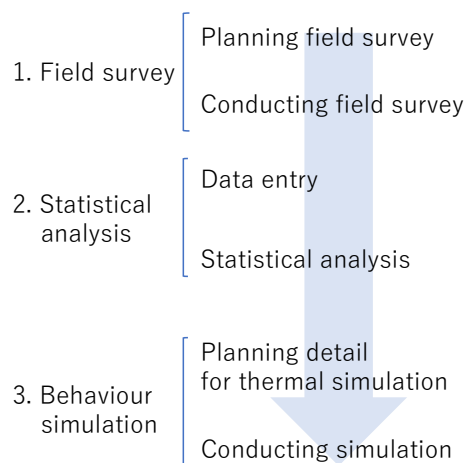


Fig. 2.1 Process of this research

2.3 フィールド調査の概要

本節では、本研究で統計解析に用いるデータを収集したフィールド調査について説明する。本調査では温熱環境測定及び同時に実施された環境調整行動状態・熱的快適性申告調査から得られたデータを用いて分析を行った。以下にその詳細を示す。

(a) 調査地域と調査対象住宅

本調査は関東地域(東京, 神奈川, 千葉, 埼玉)の 120 世帯の住宅で行われた。表 2.1 に主

な地域における調査対象住宅の数を示す。各々の調査は1年に及ぶ長期的調査である。断熱性や気密性を考慮した対象住宅の選定は行わなかったが、これらのごく普通にみられる日本における平均的な建物だと考えられる。調査地域である東京の外気温と相対湿度の傾向は図2.2に示した。平均外気温は冬季では約5°Cまで低下するのに対し、夏季では約28°Cまで上昇をしており、幅広い気候変動を持つ地域であることがわかる。また、世界各地の外気温を比較したものを図2.3にまとめたが、日本は暑熱期と寒冷期の両方の気候を持つ地域であることが確認できる。このような地域では、温かくするための行動と涼しくするための行動の両方を切り替えて実行する必要があるため、環境調整行動の研究が大事であることが考えられる。

調査空間はリビングと寝室である。調査期間は2010年6月7日～2014年8月9日の間に5回に分けられ、その内の4回は約1年間、残りの1回は夏季の一か月のみ実施された。表2.2に各調査の主な概要を示す。本調査で用いた測定機器と申告用紙の冊子は、調査対象住宅の代表者1名に、受け取りから設置、回収、返却までを依頼した。したがって、調査実施者が調査対象住宅へ訪問することはなく、3つの調査では住宅タイプの情報を問わないケースもみられた。

また、導入されているエアコン空調について、個別設置型・全館空調の分別は調査していない。しかし、全館空調システムはオフィスビルなどで導入されている一方で、一般的な住宅では個別設置型のエアコンの方が多いと想定される。そのため、全館空調が導入されているオフィスビルで見られるような一律の自動制御型の空調ではなく、居住者自らがスイッチやリモコンを使用して設定を切り替えていることを想定する。

Table 2.1 The number of investigated houses in each meteorological station

Survey	Tokyo			Chiba		Kanagawa				Total
	Nerima	Tokyo	Haneda	Funabashi	Yokoshibahikari	Yokohama	Ebina	Tsujido	Miura	
1	0	3	0	0	0	7	0	0	1	11
2	2	0	3	2	1	38	3	6	2	57*
3	0	2	0	0	0	8	0	0	0	10
4	0	3	0	0	0	25	0	2	0	30
5	0	1	0	1	0	7	0	1	0	10
Total	2	9	3	3	1	85	3	9	3	118
			14		4			100		

*2 houses have no measured data.

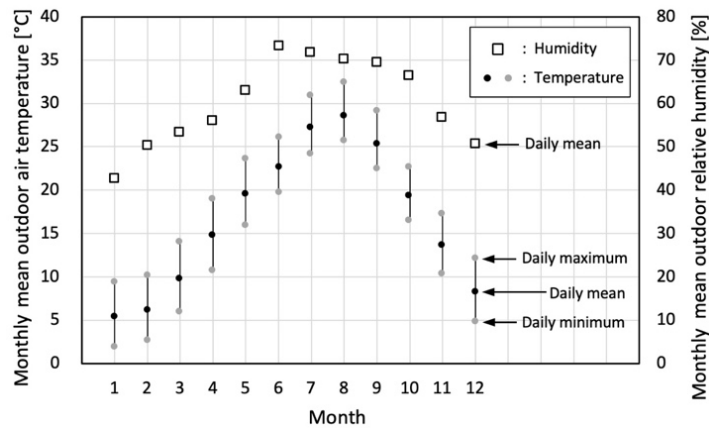
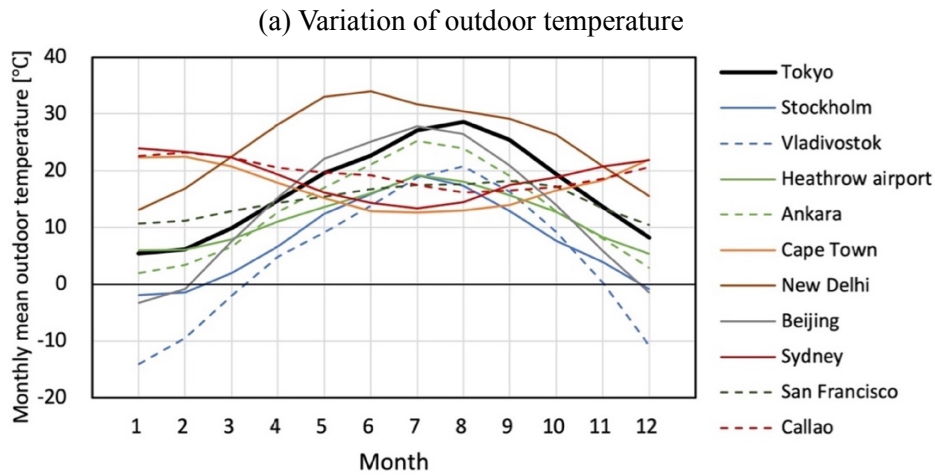


Figure 2.2 Variation of the monthly mean outdoor air temperature and relative humidity in Tokyo meteorological station (2010-2014). The monthly mean value was calculated using daily values.



(b) Detail of each meteorological station

City	Country	Latitude/ Longitude/ Altitude [m]
Tokyo	Japan	35°N/ 139°E/ 25
Stockholm	Sweden	59.35°N/ 18.07°E/ 44
Vladivostok	Russia	43.12°N/ 131.92°E/ 187
Heathrow airport (London)	UK	51.47°N/ 0.45°W/ 24
Ankara	Turkey	39.95°N/ 32.88°E/ 891
Cape Town	South Africa	39.97°S/ 18.60°E/ 46
New Delhi	India	28.58°N/ 77.20°E/ 211
Beijing	China	39.93°N/ 116.28°E/ 32
Sydney	Australia	33.93°S/ 151.17°E/ 6
San Francisco	USA	37.62°N/ 122.38°W/ 6
Callao	Peru	12.02°S/ 77.12°W/ 12

Figure 2.3 Monthly variation of outdoor temperature in each city. Monthly outdoor temperature during July 2010 to August 2014 have collected from Japan meteorological Agency website [75].

Table 2.2 The detail of field surveys

Survey	Survey period		Total	Dwellings	Number of subjects			Number of votes	
	Start date	End date		Building type	Male	Female	Total	Living room	Bedroom
1	06-7-2010	18-7-2011	11	Not asked	16	14	30	3,300	2,558
2	05-8-2011	06-9-2011	59	40 houses (wooden: 33, RC: 1, steel frame: 5, anonymous: 1) & 19 condominiums (wooden: 1, RC: 16, steel frame: 2)	52	57	109	2,861	-
3	21-7-2011	08-5-2012	10	Not asked	11	12	23	463	984
4	25-7-2012	24-6-2013	30	Not asked	26	28	54	13,083	7,061
5	10-8-2013	09-8-2014	10	5: wooden houses, 1: RC condominium, 4: anonymous	14	14	28	2,679	3,125
Total			120		119	125	244	22,386	13,728

(b) 測定方法

各部屋に1台ずつ温湿度計を設置し、10分間隔で空気温湿度を測定記録した(図2.4)。センサーは直射日光の当たらない床上約110cmの高さに設置してもらうよう居住者に依頼した。測定機器の測定範囲は0~55°Cで、測定精度は±0.3°C、分解能は0.1°Cである。外気温は気象庁のホームページで公表されている最も近い気象台の10分毎のデータ[75]を用いた。該当気象台とそれに対応する調査世帯数を表2.3に示す。本研究では、長期的なフィールド調査の中で使用できる測定機器が限られるため、人々の熱的な定量的尺度として最も代表的な物理量と思われる気温及び相対湿度を測定した。また、一部の調査のリビングではグローブ温度も測定した。



Figure 2.4 An instrument used for measuring air temperature and humidity

Table 2.3 The instruments used and their accuracy

Trade name	Measured parameters	Range	Accuracy
TR-74Ui	Air temperature	0-55°C	±0.5°C
	Relative humidity	10-95%	±5%
RTR-53A	Air temperature	0-55°C	±0.3°C
	Relative humidity	10-95%	±5%
TR-52i + SIBATA 080340-75	Globe temperature	-60 to 155°C	±0.3°C
	7.5cm diameter black-painted globe		

(c) 申告調査と方法

申告対象人数は120世帯の244人(男性:119人, 女性:125人)であった。申告した居住者の年齢は13~74歳であり, 結果として幅広い年齢層の居住者に回答してもらっている。調査協力者は1日に4~6回まで(リビング用)及び就寝前後の2回(寝室用, ただし中途覚醒時は申告しない)申告ができる申告用紙を約2ヶ月分, 冊子にし, 各個人ごとに配布を行った。なお, 申告用紙の冊子は約2ヶ月ごとに新しい冊子に交換をした。申告する居住者の負担を軽減する他, 居住者自身の日頃の生活リズムに可能な限り近づけるため, 申告は強制となることのないように, 各居住者個人の任意のタイミングで回答してもらった。また, 寝室では申告可能な任意の日に, 寝床外である「就寝前の布団に入る直前」と「起床後の布団から出た直後」の2回に申告してもらった。つまり, 申告がない日も存在し, リビングにおいては各日の申告回数も様々である。また, 同居している家族でも申告のタイミングが重なるとは限らない。

アンケート申告は, 居住者の快適性に関する項目と環境調整行動の状態に関する項目がある。なお, 寝室の調査では睡眠の質と就寝時刻・起床時刻の記入項目もある。本研究の第4章・第5章において, 熱的快適性尺度として用いた「寒暑感」を表2.4に示す。寒暑感は暑寒表現を用いて7段階で示される。本調査ではこのような段階尺度から, 申告時の状態に最も近い数字を申告してもらった。

窓開閉とエアコン冷房・暖房の使用はいずれも「0: 閉, 1: 開」や「0: off, 1: on」のように二者択一方式で申告してもらった(図2.5)。環境調整行動の状態は, 熱的快適感調査の項目として任意のタイミングに回答してもらったため, 環境調整行動の申告は「行動生起(行動開始・終了)」を表しているとは限らない。ただし, 寝室の調査では就寝前後の状態からエアコン冷暖房のon/offタイマー設定の有無を推測することは可能であるが, 本研究では申告時の使用不使用・開閉の状態から確率モデルを分析したいため, これらの違いは今後の分析課題とする。着衣量の申告は, イラスト尺度[76]を用いる手法と申告時の着衣の種類を単品ずつ回答する, 計2つの手法が実施された。得られた申告数は36,154個であった。

Table 2.4 Scale of thermal sensation

Scale	寒暑感 (Thermal sensation)
1	非常に寒い (Very cold)
2	寒い (Cold)
3	やや寒い (Slightly cold)
4	どちらもでない (暑くも寒くもない) (Neutral)
5	やや暑い (Slightly hot)
6	暑い (Hot)
7	非常に暑い (Very hot)

Questionnaire of living room

Date: Name: Voting time ⇨

	1st	2nd	3rd	4th
Hour	9	16	22	
Min.	40	30	0	

Please write 0 or 1 for adjustment condition now in living room.

Window	0 Closed	1 Open	0	0	0	
Internal door	0 Closed	1 Open	1	0	0	
Cooling	0 Off	1 On	0	1	1	
Heating	0 Off	1 On	0	0	0	
Fan	0 Off	1 On	1	1	1	

Please write preset temperature of AC-Unit now in living room.

	26	26	
--	----	----	--

Please select your clothing value now from followed image scale.

Male

Female

clo

0.3	0.3	0.3	
-----	-----	-----	--

Figure 2.5 Questionnaire for the living room (extracted from the full questionnaire and translated from Japanese to English), and an example of voting for a summer day. In this example, the resident voted three times in a day. When resident voted at 9:40, the internal door is open and fan is on. When resident voted at 16:30 and 22:00 the internal door is closed and AC-cooling and fan are on. The preset temperature of AC-cooling is 26°C for 2nd and 3rd voting.

2.4 データ整理と統計解析

フィールド調査で得られたデータのデータ整理方法と統計解析の方法について説明する。図 2.6 は得られたデータの整理プロセスである。本調査からは居住者からの申告データと室内温熱環境測定データに加えて、気象庁がホームページ上で公開している屋外気候の測定値も用いる。

本調査において、居住者申告は紙媒体であるアンケート用紙に筆記用具で記入してもらう方式である。これらの申告を Excel 上で手入力した。寒暑感・適温感をはじめとした居住者の快適性申告は尺度の数字を入力した。環境調整行動に関して、窓開閉やエアコン冷暖房使用、扇風機使用については、各々の項目を設けてその状態を 01 で入力し、着衣量やエアコン冷暖房の設定温度はその数値を入力した。

室内温熱環境の測定値は、各々の測定機器内で記録値が保持されているため、データ整理する PC にテキストファイルで取り込んだ。その後各部屋ごとに、同測定時刻のデータが同じ行になるようにして、各々の測定データを並べていった。この時、各測定データごとに、対応する測定日時も記入した。

その後、整理された室内温熱環境測定値データセットに、同じ測定日時となる屋外気候想定値を対応づけることで、室内外の温熱環境測定データセットを作成した。さらに、各居住者申告の申告日時が同じとなる温熱環境測定データを、居住者申告データセットへ対応付けることで、本研究で使用する統計解析用のデータセットを完成させた。なお、各データの対応づけには Excel 上の LOOKUP 関数を使用した。

完成したデータセットは、統計解析パッケージ SPSS および Excel を用いて分析を行った。

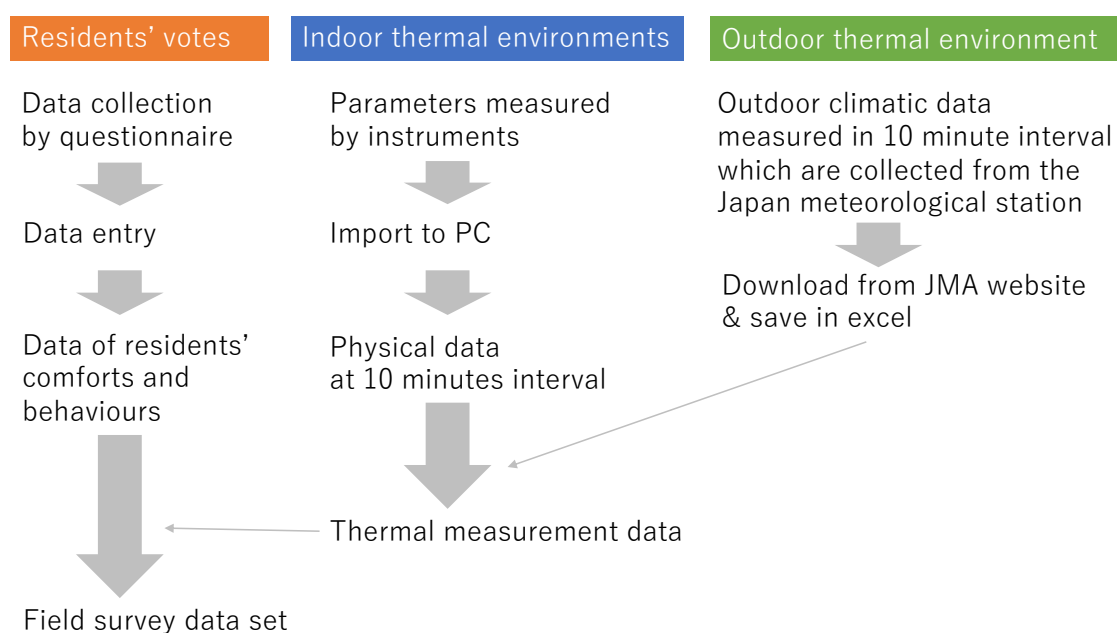


Figure 2.6 Process of data entry

2.5 本研究における環境調整行動モデルの定義と適用範囲

(a) 環境調整行動モデルの定義

本研究においては、環境調整行動割合を目的変数、気温を説明変数とし、その関係性を数式で表したものを「環境調整行動モデル」と定義する。特に、本研究では適応モデルと同様に外気温変動に対する、「適応的快適性」に焦点を当てて研究を行う。そのため、説明変数には外気温を主に設定する。

環境調整行動の選択には、居住者特性や建物特性も関係してくることが考えられる。特に、建物特性には断熱性なども含まれ、居住者行動にも大きく関わる。また、調査対象空間に複数人が同時滞在する場合、申告者のみの意思決定で実施していないことも考えられる。その一方で、本研究のような実際の住宅におけるフィールド調査では、調査回答協力者を集う観点から、困難である。本研究では特定の建物性能の住宅に焦点を当ててではなく、「関東地域の住宅居住者の傾向」として、環境調整行動の研究を進める。

(b) ロジスティック関数

環境調整行動モデルの算出には様々な関数を用いるが、本研究ではロジスティック関数をメインに使用する。環境調整行動と気温の関係性を表すロジスティック関数は以下である。

$$\text{logit}(P) = \ln \frac{P}{1-P} = a + bT \quad (2.1)$$

なお、式(1)は次のように変形できる。

$$P = \frac{\exp(a+bT)}{1+\exp(a+bT)} \quad (2.2)$$

P : 環境調整行動割合, a : 切片, b : 回帰係数, T : 気温[°C]である。環境調整行動割合は、環境調整行動の実施頻度を割合で表現しており、0~1の範囲をとる。例えば、「エアコン冷房使用割合が0.30」というのは、エアコン冷房を使用している頻度が0.30 (=30%)であると同時にエアコン冷房を使用していない頻度が0.70 (=70%)ということの意味する。なお、窓開放割合についても、窓開放幅ではなく窓開放頻度を表している。本研究の調査では、窓を開放していれば（開放幅を問わず）申告を「1(開放)」と申告してもらっているため、窓開放モデルについても開放幅は問わないものとなる。

式(2.1)および式(2.2)は T の上昇もしくは下降に応じて、 P は限りなく0に近い値から緩やかに上昇していき、限りなく1に近い値に緩やかに収束する特徴を持つ。この特徴は、外気温に対応して発現する行動機会の割合を表現するのによいので、多くの既往研究で行動モデルを表現するための関数式(例えば [24] [25] [40] [48] [28] [47] [45] [50] [52] など...) として用いられている。

また、多くの先行研究においては環境調整行動モデルの説明変数には外気温や室内気温が使用されており、相対湿度などのその他の温熱物理環境値はあまり使用されていない。例えば Stazi らの研究[77]では、窓開放/閉鎖モデルの説明変数に CO₂ 濃度よりも外気温を設定した方が決定係数が高くなっている。このことから、環境調整行動モデルの説明変数として外気温は有用であることが考えられ、本研究においても外気温を説明変数として用いることとする。

2.6 建築熱負荷シミュレーションへの環境調整行動モデルの導入に関する想定

本研究では、コンピュータを用いた建築熱負荷シミュレーションの使用を想定して分析を行う。使用を想定するものは ESP-r [78] とした。これは、1970年代後半から開発がなされており、現在でもイギリスの University of Strathclyde に所属する Energy System Research Unit をはじめとしたグループが開発を進めている、オープンソースのプログラムである。建築シミュレーションソフトウェアは EnergyPlus [79] や The BEST Program [80] など一般的に使用されている。一方、ESP-r を用いた先行研究において、窓開閉行動モデルなどを居住者行動へ導入した事例[36][40][71]があることから、本研究でも使用を想定することにした。ただし、環境調整行動モデルについて同等の導入方法となれば、その他

の建築シミュレーションへの応用も可能であろう。

2.7 分析データの傾向

本調査で得られた室内外の温熱環境測定値と環境調整行動の実態を示す。なお、本研究においては、各データをその時のエアコン冷暖房使用状況に応じて、次のように定義する。エアコン冷暖房不使用時を「FR モード(Free running mode)」、エアコン冷房使用時を「CL モード(Cooling mode)」、エアコン暖房使用時を「HT モード(Heating mode)」とし、これら3パターンを分割せずにまとめたケースを「MX モード(Mixed mode)」と定義する。

(a) 室内外温熱環境

図 2.7 に各月における申告時の外気温と室内気温の平均値を示す。外気温の変動をみると、1月に最低平均の 4.8°C にまで低下する一方、8月には 28.0°C にまで上昇しており、その差は 23.2°C である。同様に室内気温でもみても、2月には 11.9°C まで低下するのに対して、8月には 28.4°C まで上昇しており、その差は 16.5°C である。室内気温の方が外気温よりも年間の変動幅が広いが、これは建物性能や窓閉鎖による断熱が行われるためであると考えられる。また、夏季と比較して冬季の方が室内気温の差が大きい。これについて、春季や夏季、秋季では窓開放の実施によって室内の気密性が低下する一方で、冬季では窓開放を行わないことで気密性低下の機会が少ないことが考えられる。

いずれにしろ本研究における室内気温の年間変動幅は約 16.5°C と大きいため、住宅内においても環境調整行動を実施して、居住者自身の熱的快適性の保つ必要があることが明らかである。

図 2.8 は申告時の室内気温と外気温の関係を各モードで示している。なお、図中の点線は室内気温と外気温の値が同じとなる対角線である。回帰式に対する決定係数をみると、FR モードでは 0.79 であるのに対して、CL モードでは 0.07 、HT モードでも 0.10 であり、比較的低い値である。この理由はエアコン冷暖房使用時によって、外気温変動によらず設定温度を基準に室内気温が制御されるためである。また、FR モードは全ての季節のデータが含まれるのに対して、CL モードや HT モードでは特定の季節のみ対象となり、外気温の対象範囲が狭いことも理由と考えられる。

エアコン冷暖房使用時は室内気温自体を設定温度値へ制御していることから、室内気温を説明変数にするには、その行動生起からどれくらい経過した時の室内気温であるのか、数値処理を行う必要がある。先行研究[81]では温熱環境測定値に対して10分後以内にエアコン冷房使用・不使用や窓開閉の行動生起の割合を算出するモデル化の研究が挙げられる。一方、本研究で取り扱う環境調整行動のデータは行動生起ではなく、熱的主観申告時の環境調整行動の状態を記録したものであるため、行動生起後からどれくらいの時間が経っているのか、不明である。したがって、エアコン冷暖房のような室内気温を目標値で制御する目的の環境調整行動について、本研究では室内気温を使用することには注意が必要であることが考えられた。

また、FRモードを確認すると、外気温よりも室内気温の方が高くなる傾向がある。この室内外気温の差について、外気温 30°C 以下では冬季の低い外気温帯まで低下するにつれて室内外気温の差が大きくなっている。これは、窓閉鎖が多くなる冬季では、住宅の気密性能が室内気温に与える影響が大きくなることで、住宅ごとに形成される室内気温に差異が現れたためと考えられる。

図 2.9 は、リビングと寝室ごとの室内気温・外気温の時系列変動を示している。なお、各時刻の中心点が一時間ごとの平均気温であり、それに対する $\pm 2S.E.$ (Standard Error) 範囲をエラーバーで示している。ただし、表示がされていない時刻帯では、データ数が 30 未満で少なかったため算出しなかった。

外気温をみると、どの季節でも昼の時間帯で最高値に達しており、1 日における変動幅は約 5°C である。また、同じ時間帯であっても各季節の間には約 5°C の差がみられ、統計的にも有意な差である。室内気温では、外気温よりも変動幅が狭い。室内気温においても、寝室の 4 時を除くと、同時刻帯の平均室内気温は各季節間で有意な差がある。これは、室内気温の季節差は 1 日における時系列に応じた変動幅よりも広いと考えられる。本研究においては、年間のデータを用いて分析を行うが、室内外気温傾向の季節差が有意であることは、本研究における環境調整行動モデルの算出において重要である。以上のことから、室内外気温の季節変動は 1 日の時系列変動よりも大きいと考えられた。これにより、季節変動に着目する本研究の環境調整行動モデルの開発においては、室内外気温の時系列ごとの差異を無視できることとする。

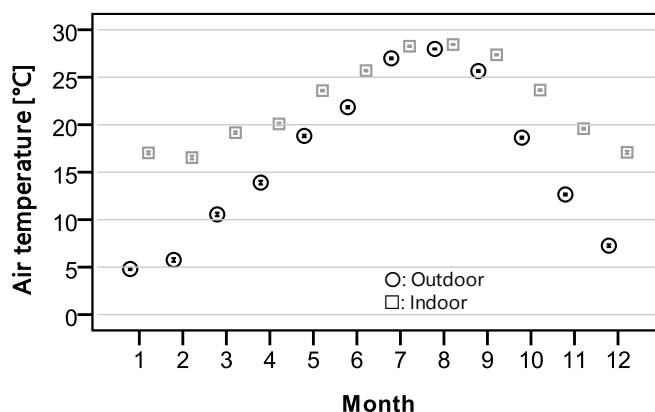


Figure 2.7 Mean outdoor and indoor air temperature measured during the voting (Mean ± 2 S.E.)

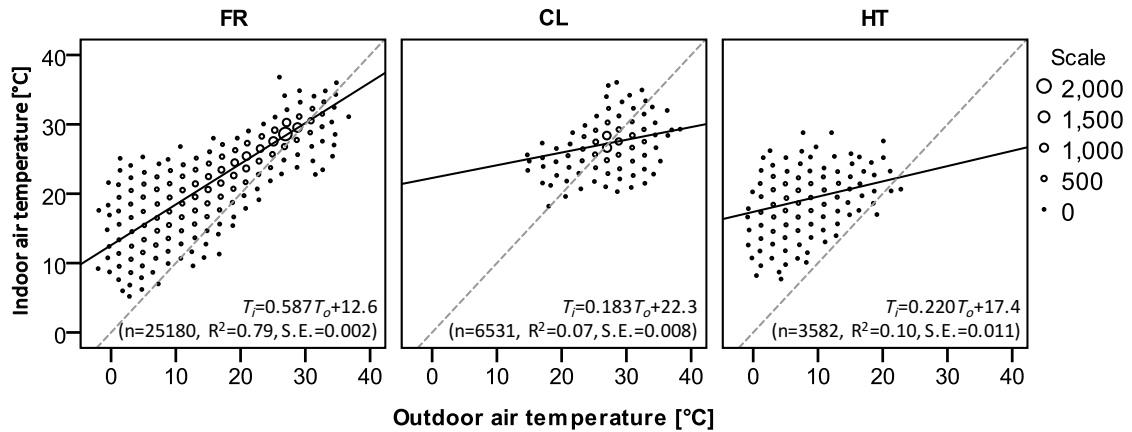


Figure 2.8 Relationship between the indoor and outdoor air temperature in each mode during the voting time. (T_i is the indoor air temperature [°C], n is the number of data, R^2 is the coefficient of determination, S.E. is the standard error of regression coefficient [°C]. The significant probability (p) of all regression coefficient is less than 0.001. The dotted diagonal line shows the equal outdoor and indoor air temperature.)

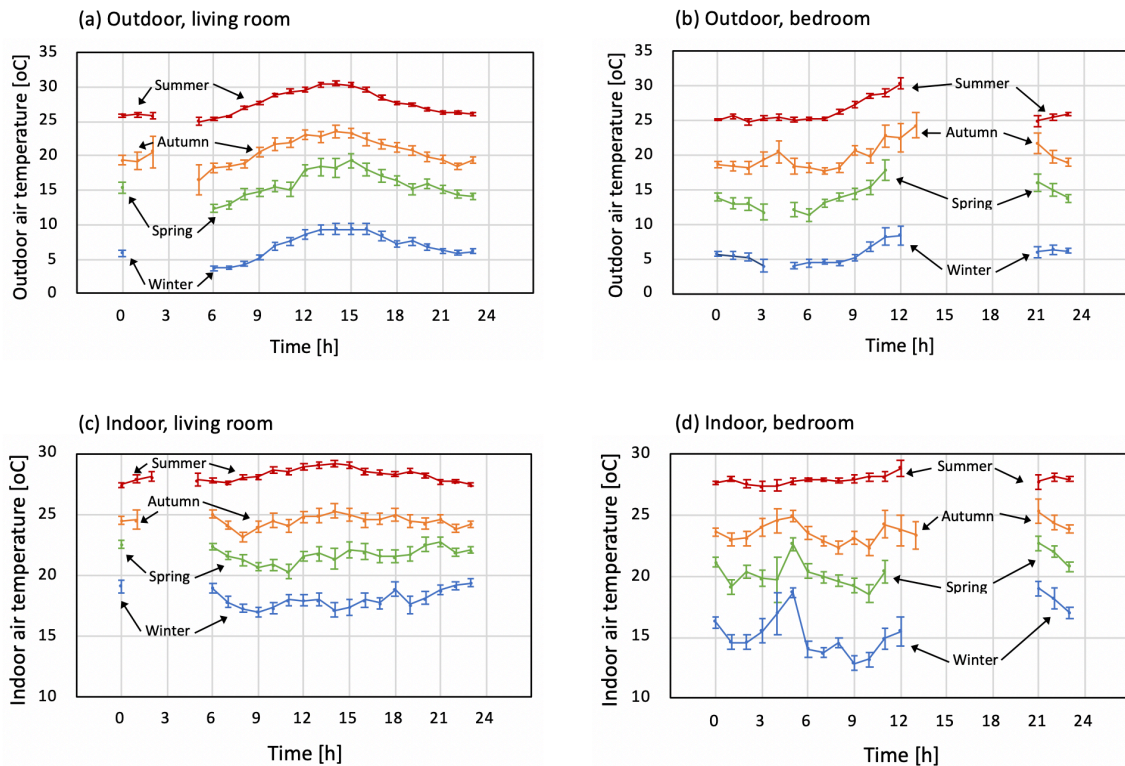


Figure 2.9 Time-wise mean outdoor and indoor air temperature during voting in each season (Mean \pm 2 S.E.).

(b) 環境調整行動

次に、調査で得られた環境調整行動のデータの傾向を把握する。

図 2.10 に、各月の申告時におけるエアコン冷房、エアコン暖房、扇風機の使用および窓開放の割合を示す。冬季では暖房使用割合が高い。春季に移ると暖房使用割合が減少し、窓開放割合が上昇し始める。夏季に移ると、窓開放割合の上昇が止まるのと同時に、エアコン冷房使用割合と扇風機使用割合の両方は上昇する傾向である。秋季に移るとエアコン冷房使用割合と扇風機使用割合が減少するのと同時に、窓開放割合は緩やかに減少をしていた。このため、エアコン冷房や扇風機の使用割合とは 1 ヶ月遅れて窓開放割合も 0 に近くなる傾向であった。秋季の終わり頃、窓開放の頻度が減少すると入れ替わるように、エアコン暖房の使用割合が増加し始め、冬季には暖房使用割合が最大となった。これら環境調整行動割合が年間で大きく変動していることから、居住者は年間を通して室内の温熱環境を調整していることが明らかとなった。また、全館空調のオフィスビルなどに代表される一律の空調制御では、日付による期間を決めて冷房・暖房の使用期間を一律に設定するケースもみられるが、本研究の居住者は設定期間に対して一律に運転するのではなく、居住者自身が使用の切り替えを行なっていることが、図 2.10 から考えられた。

前節における図 2.8 では、夏季相当の外気温帯において、FR モードの室内外気温の差が小さいこと明らかである。図 2.10 においても、夏季の約 45%で窓開放がなされている傾向であることから、窓開放による室内の気密性低下が関係していると考えられた。つまり、室内気温の傾向と窓開放行動は関係性があることを示している。

また、エアコン冷房と扇風機の使用割合のどちらも、8 月において最大割合となっており、似た傾向と捉えられる。しかし、扇風機使用割合の方が冷房使用割合よりも、使用開始時期が約 1 月早い傾向にある。これらを言い換えると、春季終盤～夏季序盤では、自然換気で十分であったため、居住者は窓開放による自然換気を最初に実施していたが、室内気温と外気温がさらに上昇し始めると居住者が暑さによる不快を感じ始めたために、エアコン冷房を用いて室内気温の制御を実施したことが考えられた。

図 2.10 も含めて、これらのことから春季から夏季における採涼行動の遷移について、次のような 3 ステップが考えられる。

1. 窓開放による、緩やかな室内対流の発生。
2. 扇風機使用による、室内対流速度の増加。
3. エアコン冷房使用による、室内気温の制御。

ただし、これらの 3 ステップの中においても、それぞれの採涼行動が同時実施されることも考えられる。前述の通り、日本の住宅においてはエアコン冷房使用と窓開放は同時実施されない傾向であるが、扇風機使用については窓開放やエアコン冷房使用と同時実施（併用）される可能性もある。これは環境調整行動モデルを「居住実態をより正確に表現する資料」として扱う場合に、含有すべき事由と考える。これらの併用可能性については、第 3 章の環境調整行動モデルの統合において、外気温を説明変数として検討を行うとする。

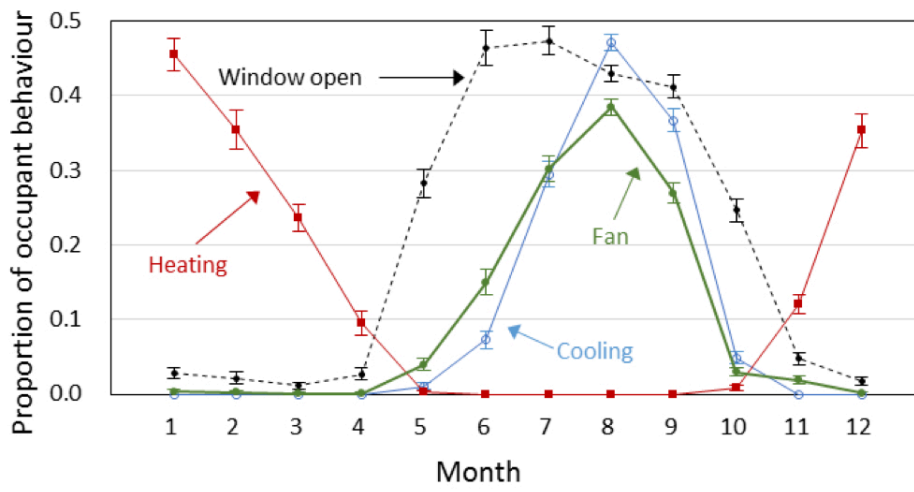


Figure 2.10 Mean proportion of the window opening and cooling, heating and fan use in each month (Mean \pm 2S.E.).

第3章 相互関係性に基づいた統合的環境調整行動 モデルの開発

3.1 本章の概要

本章では、日本の住宅における重要な環境調整行動である「窓開閉」と「エアコン冷暖房使用」「扇風機使用」について環境調整行動モデルを算出し、ひとつの統合モデルとして表現を行う。これにより、それぞれの行動頻度を相対的数値で表現を行うことで、日本の住宅における環境調整行動実施の一年を通じた変動を解明する。加えて、エアコン冷暖房の設定温度と着衣量についても環境調整行動のモデル化を検討し、モデル統合の可能性についても検討する。さらに、これらの検討から得られた結果から、日本の住宅における環境調整行動の頻度を、年間を通じた移り変わりを、比較的解明する。

3.2 では、統合された環境調整行動モデルの概念を述べる。

3.3 では、窓開閉行動とエアコン冷暖房使用/不使用について、ひとつの図中で表現できる統合モデルの算出を行う。

3.4 では、前節で得られた窓開閉/エアコン冷暖房の統合モデルへ、扇風機使用行動もモデル統合を行う。

3.5 では、着衣量及びエアコン冷暖房の設定温度について、室内外気温変動との対応関係を分析し、前節までに得られた窓開閉/エアコン冷暖房/扇風機の統合モデルへの統合可能性を検証する。

3.6 では、前節までに得られた統合モデルと着衣量・エアコン設定温度の分析結果を基に、日本の住宅における環境調整行動の年間変動を考察する。

3.7 では、本章のまとめを記する。

3.2 環境調整行動モデルの統合の意義

環境調整行動モデルとは、室内外気温などの環境物理値を説明変数として、環境調整行動の頻度や状態がどのように変動するのかを数式で表現したものである。これは、様々な環境調整行動を対象に様々な地域で研究されている。これら多くの先行研究の共通要素として、「各々の環境調整行動ごとにモデルを算出する」ことが多い点が挙げられる。

その一方で、各々の環境調整行動の選択にはその他の環境調整行動の状態に関わることも考えられる。その一般的な例として挙げられるのが、窓開閉とエアコン冷暖房使用である。エアコンは室内の空気温度を調整する空調機器であるが、室内外での熱のやりとりが多いと調整した熱エネルギーが外環境へ排出してしまうこととなる。そのため、室内の気密性を高く保つことで、エアコン使用時の運転効率の低下を避ける効果がある。このことから、エアコンは窓を閉鎖して使用することが重要である。このように各々の環境調整行動はその他の環境調整行動との相互関係性があることが考えられる。

このような環境調整行動の相互関係は、環境調整行動モデルの多くの先行研究において十分に反映されていない。相互関係性を反映させたモデルを開発することができれば、より実態に近い居住者行動の解明に寄与できると考えられる。特に、寒い冬季から暑い夏季の両方の両季節を持つ関東の住宅では、採暖行動と採涼行動の両方を使い分けて生活を送

っているため、複数の環境調整行動を使い分ける関東の居住者の行動実態を解明するには、環境調整行動の相互関係性も考慮することに重要な意義を持つと考えられる。

そこで第3章では、関東地域の住宅で実施される一般的な環境調整行動の選択における相互関係性を明らかにし、相互関係性が反映された統合的な環境調整行動モデルを開発する。また、開発された統合的な環境調整行動モデルを用いて、関東の居住者行動実態の定量的な解明を行う。

3.3 窓開閉行動とエアコン冷暖房使用のモデルの統合

前節で述べた統合の概念を基にして、環境調整行動モデルの統合を行う。はじめに、窓開閉行動とエアコン冷房使用、エアコン暖房使用のモデルの統合を試みる。

3.3.1 統合の概念

本研究における環境調整行動モデルの統合の概念をはじめに述べる。本研究のきっかけは、「窓開放モデルの算出」から始まった。第2章でも述べた通り、近年の環境調整行動モデルはロジスティック関数を用いて算出されるケースが多い。これは、説明変数となる温熱環境物理地の上昇もしくは下降に対して、時目的変数となる環境調整行動割合は限りなく0に近い値から限りなく1に近い値へ遷移する傾向を持っている。例えば外気温の上昇に対してエアコン暖房使用の頻度は減少していき、エアコン冷房や扇風機使用の頻度は上昇していく。これら各々の環境調整行動の頻度の増減を確率的に算出するためは、一次関数よりもロジスティック関数のような収束傾向を持つ関数を用いた方が都合がいいのである。

その一方で、窓開放行動については「涼しくするための行動」であるにもかかわらず、エアコン冷房使用と同時実施されない特性を持つ。そのため、気温上昇に対する窓開放頻度は多くなるが、冷房使用への選択の切替によって頻度が減少傾向に切り替わる特性を持つと考えられる。エアコン冷房機が十分に普及していない地域や時代であれば窓開放モデルにロジスティック関数ではなくベルカーブ（山型）の関数を用いる必要がある。このような傾向に対して、先行研究では異なる関数を用いている事例もみられた。Haldi & Robinson [37]はロジスティック関数の一次関数を二次関数～四次関数に置き換える「Polynomial logit」を用いることで、外気温上昇に対して窓開放割合の上昇と下降の両方を実現した。Kimら [24]もロジスティック関数に二次関数を利用することで、窓開放割合モデルを算出している。Takasuら [25]はガウス関数を用いることで同様に割合の上昇と下降を実現している。また、私の既報も含めたいくつかの先行研究では、エアコン冷暖房不使用時（FRモードと呼ぶ）のデータのみ抽出して窓開放行動モデルを算出するケースもみられた。これはエアコン不使用時であっても採涼行動は必要であることから、エアコン不使用時には窓開放頻度が増加すると考えられることで、ロジスティック関数を窓開放モデルへ適応できるためである。私自身も以前はこの手法で窓開放モデルを算出していた。

ところで、外気温上昇に対する窓開放割合の変動傾向がベルカーブを描くのはなぜか？
というと、採涼行動の選択を窓開放からエアコン冷房使用へ切り替えているためである。
これまでの窓開放モデル算出時に使っていた「FR モード」の定義は「エアコン不使用時」
であることから、「1.00 からエアコン使用割合を差し引いた値」は「エアコン不使用割合」
つまり FR モードの割合と考えられる。このことを考慮すると、エアコン使用割合を用いて
算出された FR モード割合と FR モード時の窓開放割合を掛け合わせることで、外気温上昇
に応じた窓開放割合の減少傾向をエアコン冷房使用頻度の上昇具合に応じて算出できる手
法の可能性に到達した。

この算出過程について、イメージを用いて視覚的に表したものが図 3.1 である。気温が高
い時期において、エアコン冷房使用モデルの回帰線と FR モード時の窓開放モデルの最大割
合 1.00 には対応関係があることによって、エアコン冷房使用の増加に応じて窓開放モデル
の最大割合 1.0 を示す線が MX モードの平面上では低下する傾向を示す。それによって、
窓開放モデルの回帰線も（上から押されるように）低下傾向へ変形することになる。

そして、このような関係性が成り立つ関係性があることは、（パズルのピースをはめるよ
うに）同じ図中でまとめて示すことができることに気がついた。一台のエアコンに対して
冷房と暖房の双方を同時に使用することはないことも考慮すると、エアコン冷房とエア
コン暖房、FR モードの窓開放の 3 つのモデルを算出し、各環境調整行動の相互関係を数式で
表現することにより、一つの図中で窓開閉とエアコン冷暖房使用の頻度を相対的数値で表
現できる、図 3.2 のような統合的な環境調整行動モデルの算出が可能と考えた。

節 3.3 ではこれらの統合概念を参考に、関東のフィールド調査のデータを用いて窓開閉・
エアコン冷暖房使用の統合モデルの開発を実践する。さらに、統合モデルで得られる窓開
放行動モデルについて、従来手法であるガウス関数や Polynomial logit を用いたケースと
比較をする。

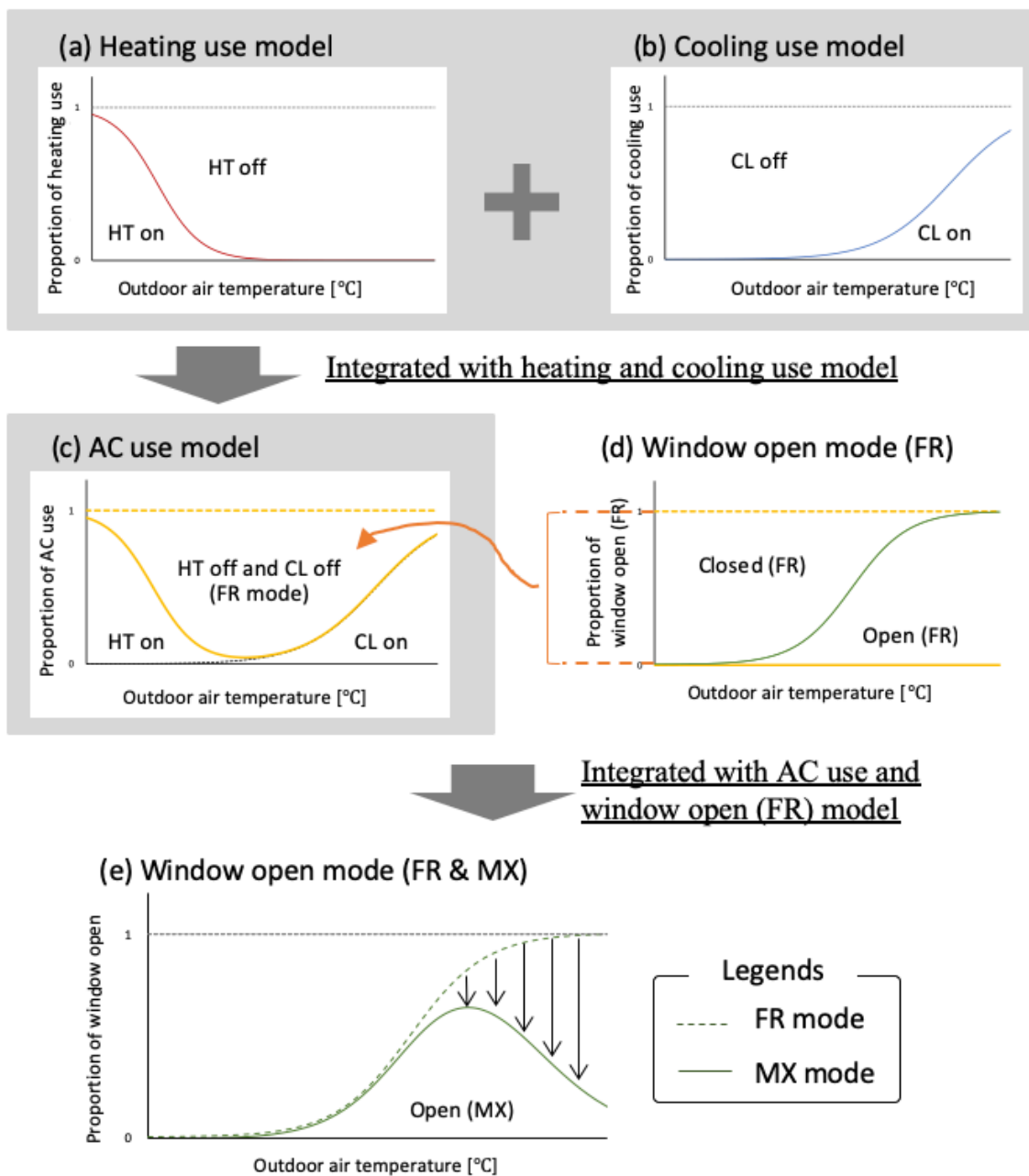


Figure. 3.1 The process of calculation for window open model in MX mode.

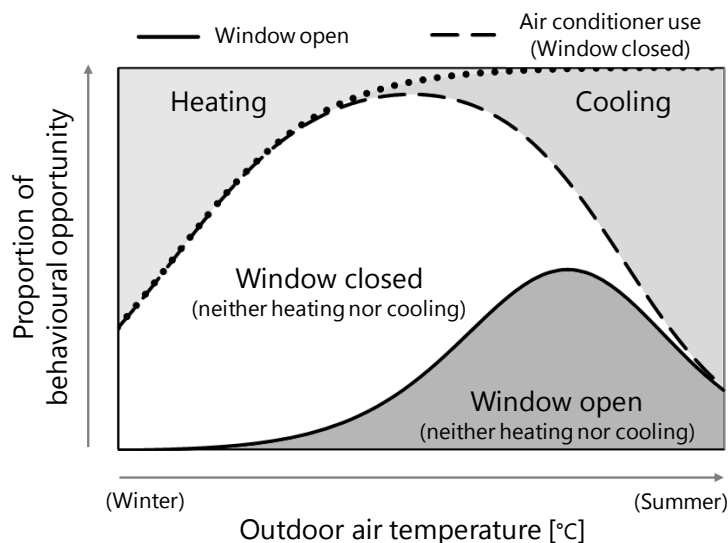


Figure 3.2 The model concept of the opportunity of air conditioner use and window open/closed behaviours explained by outdoor air temperature.

3.3.2 計算手法

以下には、窓開閉・エアコン冷暖房使用の統合モデルの分析手法について説明する。また、窓開放モデルの傾向を比較するために用いたガウス関数と Polynomial logit についても説明をする。

(a) ロジスティック回帰式を用いた冷暖房使用と窓開放の統合モデル

ここでは、前節の窓開閉・エアコン冷暖房使用の相互関係を基に、本研究で新たに開発しようとする環境調整行動モデルの算出方法について述べる。本手法では、式(2.1)のロジスティック関数を用いて、環境調整行動割合 P に暖房使用割合 P_{HT} と冷房使用割合 P_{CL} 、FR モードにおける窓開放割合 P_{WFR} を当てはめた3種類の式を算出する。なお、窓開放割合については既往研究 (43)と同様に、外気温上昇に対して P_{WFR} が上昇傾向のみとなる考えに基づいている。そして、「窓開放は冷暖房使用と同時に Roweれない」という相互関係性から、これら3種類の式を以下の関係式に代入して、MX モードの窓開放割合 P_W を算出する。

$$P_W = P_{FR} \times P_{WFR} = \{1 - (P_{HT} + P_{CL})\} \times P_{WFR} \quad (3.1)$$

P_W : MX モードの窓開放割合, P_{FR} : FR モードの割合である。この関係式を用いることで、1つの図中にMXモードの窓開放割合と冷暖房使用割合を相対的に示せる。つまり、測定データの外気温範囲において図中では以下の関係式も成立すると仮定できる。

$$P_{HT} + P_{CL} + P_W + P_{WCFR} = 1 \quad (3.2)$$

P_{WCFR} : MX モードを分析対象とした時のエアコン冷暖房不使用時の窓閉鎖割合である。この式(3.2)は図3.2の縦軸全体の構成割合を表している。

この算出方法では、窓開放の回帰線の凸形状を冷房使用割合の増加を用いて表現しているが、もし冷房使用がほとんどない対象を分析すると、窓開放の回帰線は凸形状にならず、

上昇傾向のみを示す。つまり、この手法では窓開放の回帰線の形状を冷房使用の多さに応じて適切に自動で設定することになる。このように、窓開放モデルの回帰線傾向について、外気温の上昇に応じた下降傾向の有無の両方を示せる点は先行研究にあるガウス関数では持たない特徴でもある。

(b) ガウス関数 [25] [82]

次に、窓開放モデルを算出するために用いたガウス関数について説明する。ガウス関数は以下の式で表される。

$$P_w = Ae^Y \quad (3.3)$$

$$Y = -\{(T_o - \mu)\}^2 / (2\sigma^2) \quad (3.4)$$

A : 回帰線が示す最大窓開放割合、 μ : 最大窓開放割合となる時の気温[°C]、 σ : ピーク幅の制御値である。 σ は回帰線の広がりを表し、値が大きいほど緩やかで広がりのある回帰線となる。

(c) Polynomial logit [24] [37]

Polynomial logit は、式(2.1)で説明したロジスティック関数の右辺 $a + bT_o$ を二次関数及びそれより高次の関数で構成した関数であり、以下のように表される。

$$\text{logit}(P_w) = a + \sum_{i=1}^n (h_i T_o^i) \quad (3.5)$$

a : 定数、i : 関数の次数、n : 関数の最大次数、 h_i : 回帰係数である。既往研究ではベルカーブの回帰式となるように二次関数[24]や四次関数[37]を用いて分析を行っている。そのため、本研究でも同様に二次あるいは四次関数を用いて算出する。

(d) 各関数モデルの特徴

(a)~(c)で提示した窓開放モデルの算出方法の特徴を表 3.1 に示す。回帰式の算出に必要な環境調整行動データの種類はガウス関数や Polynomial logit では窓開閉のみであるが、提案手法(a)では冷暖房使用データも分析に必要とする。一方で、提案手法ではロジスティック回帰式を組み合わせる窓開放のモデルを算出しており、算出過程で冷暖房使用割合が考慮されている。したがって窓開閉と冷暖房使用の相互関係性を相対的割合で算出でき、一つの図中で表現することができる。

回帰線の特徴については、ガウス関数では傾きの左右対称性が必然的に設定される。したがって、外気温の上昇に対する窓開放割合の上昇・下降の傾斜が同じになるため、上昇・下降の傾向が互いに干渉しあう特徴がある。一方、本研究で提案した手法と Polynomial logit では左右対称性が必然ではなく、窓開放割合の上昇傾向と下降傾向の違いを表現し得ると考えられる。特に窓開放割合が上昇・下降傾向となる高い外気温帯においても、それぞれについて独立に傾きを設定でき、実態に近いモデルが算出に有用となる可能性がある。回帰係数に関する特性について、Polynomial logit では式(3.5)の次数 i が高くなるほど回帰係数における有効数字の必要桁数が多くなる傾向がある。Polynomial logit では回帰係数の安易な四捨五入による回帰線の変形により、分析結果からかけ離れた回帰モデルとなるリスクが高くなるため、回帰係数の有効桁数を慎重に検討する必要がある。

Table 3.1 The characteristics of regression lines in each analysed methods.

Analysis methods	Data collection of building controls for calculation	Asymmetrical slope	Relative proportion	Simplicity of the coefficient
(a) Suggestion of this research	Window, Cooling & Heating	Yes	Yes	Yes
(b) Gaussian function	Window	No	No	No
(c) Polynomial logit		Yes		

3.3.3 窓開閉・エアコン冷暖房使用の統合モデルの算出

(a) ロジスティック関数による各環境調整行動モデルの算出

窓開閉・エアコン冷暖房使用の統合モデルを算出するために、本研究におけるロジスティック回帰分析を用いた冷房使用及び暖房使用・FRモードの窓開放の割合と外気温の関係を示す。

$$\text{logit}(P_{CL})=0.277 T_o-8.090 \quad (n=34,681, \text{S.E.}=0.004, R^2=0.26, p<0.001) \quad (3.6)$$

$$\text{logit}(P_{HT})=-0.233 T_o+0.755 \quad (n=30,568, \text{S.E.}=0.005, R^2=0.26, p<0.001) \quad (3.7)$$

$$\text{logit}(P_{WFR})=0.241 T_o-5.561 \quad (n=25,212, \text{S.E.}=0.003, R^2=0.35, p<0.001) \quad (3.8)$$

これらの式を基に環境調整行動と外気温の関係を図示したものが図 3.3 である。外気温が 4℃以下では暖房の観測割合のプロットが 0.4~0.5 の範囲で頭打ち傾向となり、回帰線との乖離がみられる。これは外気温が 29℃以上の場合の冷房・窓開放も同様である。その理由としては省エネ意識による着衣調整や扇風機といったその他の行動の併用が挙げられる。式(2.1)で示した一般的なロジスティック関数では、0 に限りなく近い値および 1 に限りなく近い値に収束する傾向を持つため、その他の行動の併用による最大冷房使用割合の減少に対して、必ずしも精度よく回帰するとは限らない特徴のためである。本節では窓開閉とエアコン冷暖房のみを年間変動の中で相対的にみることが目的であるため、その他の行動の考慮については次節以降の課題とする。

回帰線を見ると、外気温上昇に応じて暖房使用割合は低下していくが、冷房使用や FR モードの窓開放の割合は上昇していくことが分かる。ただし、最大暖房使用割合は冷房の場合と比較して小さい割合で推移している。これについて、寒い季節では暖房使用以外にも着衣調整といったその他の環境調整行動も行うことで、少ない暖房使用であってもその環境に適応できている居住者が存在するためと考えられる。また、寝室であれば布団の調節による寝床内環境の改善も行うことで、寝床外である寝室内気温が低くても睡眠をできるようにしているのではないかと考えられる。このようにリビングと寝室では環境調整行動の選択肢が異なることも考えられるため、滞在場所や時間帯の違いを考慮した研究も行う必要もある。

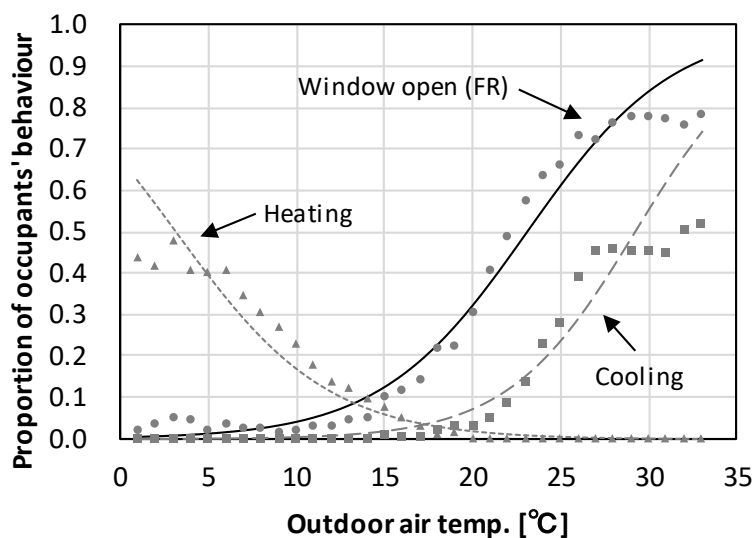


Figure 3.3 The stochastic models of each occupants' behaviours explained by outdoor air temperature.

(b) MX モードの窓開放モデルおよび既存手法との比較

次に、前節で求めた3つのロジスティック回帰式を用いて、MXモードの窓開放割合を算出する。算出方法は式(3.1)で示した関係式を用いた。これによって算出したMXモードやFRモードの窓開放割合と外気温の関係を図3.4に示す。FRモードでは窓開放割合が上昇傾向のみだったのに対して、MXモードでは26.0°Cで最高窓開放割合0.47となり、この外気温より上昇しても低下しても窓開放割合は低下する。

表3.2は提案手法における窓開放割合の回帰線の左右非対称性を検証したものである。もし回帰線が左右対称であれば、最大窓開放割合である26.0°CからX軸上で±の両方向に等間隔に進んでいくと同じ窓開放割合となるが、左右非対称であれば同じ割合とはならない。それがどれ程であるかを確認するために、26.0°Cから+方向に33.0°C(つまり-方向に19.0°C)まで、1.0Kごとに等間隔で窓開放割合の差 D_{P_w} を以下の式を用いて求めていった。

$$D_{P_w} = P_{26-n} - P_{26+n} \quad (n=1, 2, 3, \dots, 7) \tag{3.9}$$

$P_{26\pm n}$: 26±n°Cの時の窓開放割合である。表3.2を確認すると、最大窓開放割合の頂点から離れるほど D_{P_w} が大きくなるため、非対称性は実現しているが、n=6でも0.011の差しかないことが分かった。これは、外気温20°Cの場合は32°Cの場合と比べて1.1%しか窓開放割合が高くないことを意味する。この差は非常に小さく、誤差範囲内と考えることもできる。これらのことから、提案手法による窓開放割合の回帰線は左右非対称が確かに実現されているが、本研究のケースでは必ずしも必要な条件ではないことが確認できた。

また、本節では、既往研究で行われていた既存の手法と回帰線の傾向がどのように異なるのかを知るために、ガウス関数及びPolynomial logitによる回帰分析を行った。なお、これらの関数による回帰分析では外気温1°Cごとの平均窓開放割合 P_{w0} を算出し、データ数nに基づく重み付け回帰を行った(表3.3)。ただし、Polynomial logitでは P_{w0} を $\text{logit}(P_{w0})$ に変

換してから回帰分析を行った。ガウス関数及び Polynomial logit を用いて得られた、MX モードの窓開放モデルの回帰式を以下に示す。

ガウス関数

$$P_w = 0.473e^Y \quad (3.10)$$

$$Y = -\frac{(T_o - 26.5)^2}{2 \times 6.8^2} \quad (3.11)$$

Polynomial logit (Quadratic)

$$\text{logit}(P_w) = -2.386 \times 10^{-3} T_o^2 + 0.254 T_o - 5.407 \quad (3.12)$$

Polynomial logit (Quartic)

$$\begin{aligned} \text{logit}(P_w) = & 2.0496 \times 10^{-5} T_o^4 - 2.2459 \times 10^{-3} T_o^3 \\ & + 7.289 \times 10^{-2} T_o^2 - 0.6418 T_o - 2.592 \end{aligned} \quad (3.13)$$

これらの関係式を表 3.3 の P_{w0} と共に図示したものが図 3.5 である。また、各手法による最大窓開放割合とその時の外気温も表 3.4 に示す。ただし、回帰線を見てみると二次関数を用いた Polynomial logit では外気温上昇に対して窓開放割合も上昇する傾向のみとなっている。これは表 3.3 で示した観測される窓開放の現象(P_{w0})の傾向と異なる回帰線であるため比較対象外とする。

観測値をみると、外気温上昇に応じて窓開放割合は上昇した後に緩やかな減少に転じている。この上昇下降傾向は節 3.1.1 で述べた「エアコン冷房使用との相互関係性」によるものと考えられる。また、観測値上では 27°C 付近で谷となるような小さな上昇減少傾向があるようにみえるが、外気温 27°C のみに発現するような特別な行動や理由はみつからない。したがって、25°C 付近から全体的に緩やかな減少と捉えた方が理にかなっていると考えられる。25°C 以降の減少が緩やかになる理由は、前節と同様にその他の環境調整行動の併用や居住者の生活習慣の違いなどによるものと推測できる。

各モデルの回帰式を見てみると、Polynomial logit では回帰係数の有効数字が最大 5 桁であり、節 3.3.2(d) で述べた通り、その他の手法を比較して多いことが分かった。最大窓開放割合は 0.47~0.48 であり、どれも近い値である一方、最大窓開放割合の時の外気温は 26.0~26.9°C となり、0.9K の差があった(表 3.4)。この 0.9K の差は、外気温の年間変動幅と比較すれば小さいと考えられる。

回帰線全体で比較すると、ガウス関数を用いた回帰分析結果が本研究の提案手法と最も近似しているが、外気温が約 26°C 以上の下降傾向では提案手法の方が最大 0.06(33.0°C) 低かった。これは、ガウス関数の持つ左右対称性により、約 26°C 以上の下降傾向が外気温 18~25°C 付近の回帰線の傾きに影響されており、差が表れたと考えられる。また、本来は非対称性を実現できる提案手法の方が観測値にフィットしてほしいが、申告の多い 27~28°C の観測割合に引きずられたために、提案手法の減少傾向の勾配が急になったと考えられた。

しかし、いずれの手法でも年間の外気温変動に対して同様の窓開放割合の変動傾向を表しており、それを多くの先行研究で利用されている「一次関数と対応させたロジスティック

ク関数」の組み合わせによって、エアコン冷房使用頻度に応じた窓開放割合の補正ができる本研究の提案手法は、取り扱い易い新たな手法の1つと考えられる。

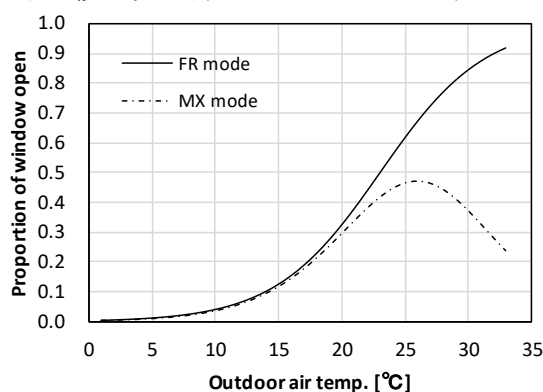


Figure 3.4 The stochastic models of window open in FR and MX mode explained by outdoor air temperature.

Table 3.2 The values for verification of asymmetry of MX mode regression curve.

T_o	D_{Pw}
26	-
26±1	1×10^{-4}
26±2	0.001
26±3	0.002
26±4	0.005
26±5	0.008
26±6	0.011
26±7	0.014

Table 3.3 The number (n) and proportion of observed window open in each outdoor air temperature rounded at 1K interval.

T_o [°C]	n		P_{wo}	T_o [°C]	n		P_{wo}
	All	Open			All	Open	
1	320	4	0.013	18	1012	217	0.214
2	439	9	0.021	19	1006	217	0.216
3	696	18	0.026	20	1221	360	0.295
4	768	20	0.026	21	1245	491	0.394
5	762	12	0.016	22	938	423	0.451
6	844	17	0.020	23	958	479	0.500
7	944	18	0.019	24	1224	610	0.498
8	907	15	0.017	25	1302	641	0.492
9	790	10	0.013	26	2355	1081	0.459
10	863	14	0.016	27	3245	1315	0.405
11	781	22	0.028	28	2400	1025	0.427
12	861	23	0.027	29	1639	732	0.447
13	877	34	0.039	30	1052	462	0.439
14	1003	45	0.045	31	841	370	0.440
15	893	85	0.095	32	656	255	0.389
16	983	111	0.113	33	369	142	0.385
17	1057	146	0.138	Total	35251	9423	-

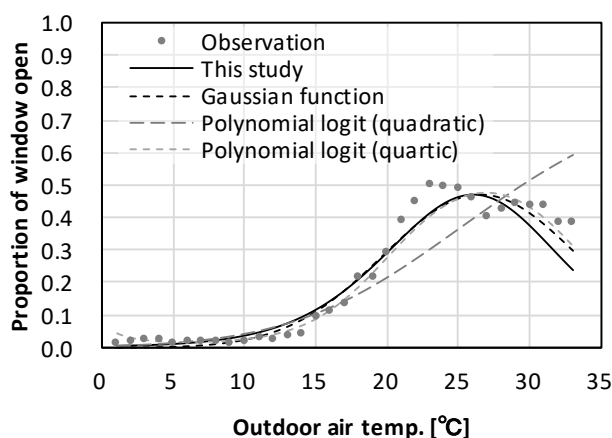


Fig. 3.5 The window open models in each methods.

Table 3.4 The maximum proportion of window open in each models, and the outdoor air temperatures when P_w is max.

Regression equation	P_{Wmax}	T_o [°C]
This study	0.47	26.0
Gaussian function	0.47	26.5
Polynomial logit (quartic)	0.48	26.9

(c) エアコン冷暖房使用の統合モデルの算出

図 3.4 の MX モードの窓開放割合は冷暖房使用割合を計算で考慮しているため、図 3.2 のように一つの図中に相対的に示すことが可能である。本節では MX モードの窓開放割合に加え、冷暖房の使用割合も含めて相対的に図示した統合モデルを図 3.6 に示す。この図では、各環境調整行動割合の積み上げグラフとなるため、各線の間 Y 軸方向の幅が各環境調整行動の割合となる。例えば外気温 15°C の時は $P_{HT}=0.061$ 、 $P_{CL}=0.019$ 、 $P_w=0.115$ 、 $P_{WCFR}=0.805$ となり、これらの割合を式(3.2)に示すように合計すると 1.00 となる。また、特徴的な傾向を示す外気温の代表値とその環境調整行動割合を表 3.6 に示す。

前述の通り、外気温上昇に応じて窓開放行動は最高窓開放割合の 0.47 となる 26.0°C まで上昇傾向を示し、それ以降は冷房使用への切り替えの影響で減少傾向になる。ただし、26.0°C ではまだ窓開放割合の方が冷房使用割合よりも高い傾向であり、窓開放と冷房使用の割合の大小関係が入れ替わるのは外気温が 28.3°C の時であり、エアコン冷房使用および窓開放の割合の共に 0.44 となることがわかった。外気温がこれより上昇すると冷房使用割合の方が高く、外気温が低下すると窓開放割合の方が高くなる。このような環境調整行動割合の大小関係は、居住者行動の優先傾向の解明などに役立つと考えられる。

冷房と暖房の使用割合は外気温が 17.3°C のときに双方ともに 0.04 となり、外気温がこれより上昇すると冷房の方が高く、反対に低下すると暖房の方が高くなる。しかし、実際の

一般住宅の生活中において、冷房使用期間を終えてすぐに暖房使用期間に入ることは稀であり、これらの期間の間にはエアコンを使用せず窓開閉による自然換気調節を中心に行う期間があるはずである。このような遷移期間では、春には冬の、秋には夏の記憶が履歴的に影響している可能性がある。なお、春季および秋季といった季節遷移期の環境調整行動の差異については、第4章で検討を行っている。

以上より、節3.3では窓開閉・エアコン冷暖房使用の統合モデルを算出でき、各々の行動頻度を相対的割合として一つの図中で示すことができた。この統合モデルから、窓開放とエアコン冷房使用の優先傾向は28.3℃を基準に入れ替わることが明らかとなった。

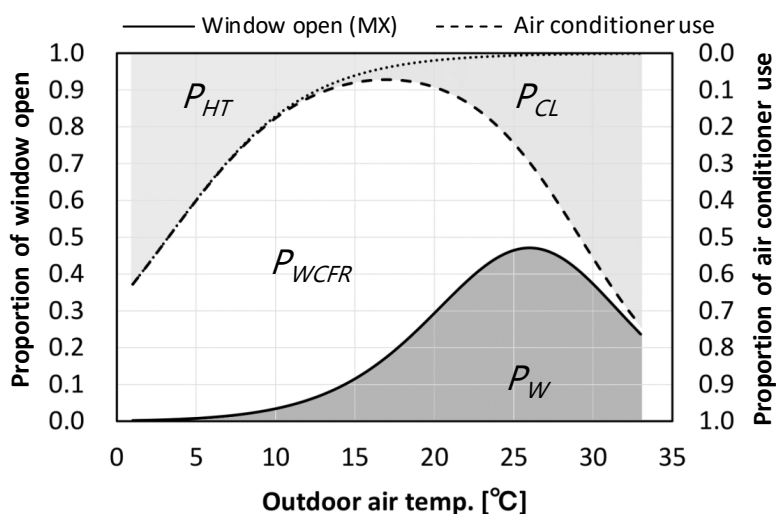


Figure 3.6 The stochastic model as relative proportion of each behaviours explained by outdoor air temperature.

Table 3.6 The distinctive points in the model which show relative proportions.

T_o [°C]	Proportion
12.9	$P_{WCFR\max}^* = 0.82$
17.0	$P_{FR\max} = 0.93$
17.3	$P_{HT} = P_{CL} = 0.04$
26.0	$P_{W\max} = 0.47$
28.3	$P_W = P_{CL} = 0.44$

* The maximum proportion of window closed excepted with air conditioner use

3.4 窓開閉/エアコン冷暖房使用統合モデルへの扇風機使用の統合

本節では、前節で得られた窓開閉/エアコン冷暖房の統合モデルに、扇風機使用も統合することで、関東の住宅における居住者の環境調整行動の実態を解明することを目的とする。

前節では、「エアコン使用時は運転効率の観点から、窓は閉鎖する」という相互関係性を基に、これらの行動モデルを統合できた。一方、扇風機は空気温度を直接制御するのではなく、室内対流速度を増加させる機器であり、室内の気密性に依りて運転効率が大きく影響を受けるものではない。そのため、扇風機使用とその他の環境調整行動との併用といった、相互関係性については不明である。先行研究においても、扇風機使用をモデル化した事例はみられるが、その他の環境調整行動との相互関係性を反映したモデルは多くみられない。したがって、扇風機使用と同じく採涼行動である窓開放やエアコン冷房との相互関係性を解明した上で、扇風機使用のモデル統合を試みる。

3.4.1 統合の概念

前節でも述べた通り、日本における扇風機とエアコン冷房・窓開放の併用の傾向について、外気温を説明変数とした環境調整行動モデルの事例はまだ十分でない。このような状況においては、環境調整行動モデルを算出するにあたり、回帰分析を行う前にモデル曲線の一般的傾向の仮説を立てる必要がある。

そこで、外気温を説明変数とした場合の扇風機使用モデルの曲線特性の仮説を図 3.7 のように立てた。暑い時期に近づくにつれて、室内対流だけでなく室内気温の低下の必要性もでてくることから、扇風機単独使用と扇風機&窓開放併用はガウス関数のような曲線になると考えられる。つまり、外気温上昇に応じて行動割合が上昇した後にある外気温値を境に低下傾向を持つ。一方、扇風機&エアコン冷房併用は、窓開放&扇風機併用と入れわかるように増加していき、比較的大きな割合値まで上昇すると予想される。

この回帰曲線では、もし外気温が限りなく高い値と仮定した場合に、扇風機&エアコン冷房併用割合は限りなく 1、つまり 100%に近い値になり、これは全ての居住者が扇風機とエアコン冷房を併用して実施することを意味する。しかし、実際のところ、冷房と扇風機の併用は 100%に近い値にまで至らないことも十分考えられる。なぜなら、着衣調整やうちわの使用、冷たいものを飲食するというような、その他の環境調整行動の代用で不快を避けられることも考えられるためである。また、エアコン冷房を好まない居住者にとっては、現実的な外気温範囲においては扇風機の単独使用や窓開放との併用で十分であると考えられる可能性もある。

また、ガウス曲線を描くと仮定する扇風機単独使用や扇風機&窓開放併用のどちらのケースにおいても同様であり、最大行動割合がどれほどまでに至るのかは、仮説段階では予想ができない。これは、扇風機単独使用と扇風機&窓開放の併用のどちらのケースが最大行動割合が高いのかも、判断ができないことを意味する。

しかしながら、図 3.7 で示した仮説モデルがどれくらい適切に表現できているのかを検証する必要がある。そして、その検証を踏まえた上で、適切な関数を用いて回帰分析を行う必要がある。そこで、次節では扇風機の使用割合を単独使用・併用ごとに算出を行い、実査の扇風機使用の傾向を明らかにする。

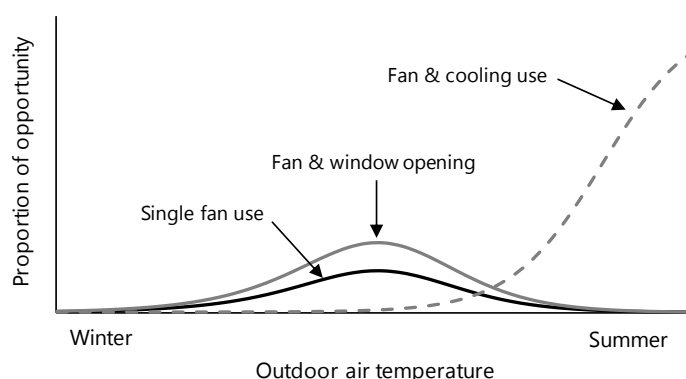


Figure 3.7 A hypothetical model for single and combined fan uses to be explained by outdoor air temperature

3.4.2 扇風機の単独使用/併用の傾向の把握

前節でも述べたように、回帰分析を行う前に、扇風機の単独使用と併用の実際の割合変動の性質を確認する必要がある。図 3.8 に外気温に応じた扇風機の単独使用と窓開放およびエアコン冷房との併用の行動割合を示す。なお、外気温は 1°C ごとに算出を行なった。傾向をみると、扇風機の単独使用・併用の共に、外気温上昇に応じて行動割合も増加し、それぞれのケースで特有の収束割合を持つ傾向がみられた。

扇風機単独使用について言えば、例えば外気温 20°C 以下では行動割合が 0.05 未満となる。扇風機&窓開放併用の割合では、他の 2 ケースと比較して行動割合が大きい傾向である。これは、扇風機&エアコン冷房併用のケースの方が高外気温帯における行動割合が高くなるという前節の仮説とは異なる傾向であった。この理由についても前節で述べた通り、居住者の行動の好みであったり、節電意識によるものが関係していると思われる。

扇風機単独使用と窓開放&扇風機併用のケースについては、外気温が 17°C から上昇すると、行動割合も増加する傾向であった。一方、扇風機&エアコン冷房併用のケースでは、外気温が 21°C より上昇すると行動割合も増加する傾向であった。これらの行動開始の外気温の差は 4°C であった。この 4°C の外気温差は窓開放からエアコン冷房使用への行動選択の遷移を意味すると考えられ、これは仮説モデルで示した傾向と一致していると考えられる。

しかし、扇風機の単独使用および扇風機&窓開放併用について、実際の割合と仮説モデルの傾向は対応していないことがわかった。したがって、回帰分析を行うためには、その他の適切な関数を選択する必要がある。これら全ての 3 ケースについて、外気温上昇に応じて行動割合も上昇し、各々の最大割合へ収束する傾向を持っている。

そこで、最大割合を確認すると、扇風機の単独使用では外気温が 33°C の時の 0.064、扇風機&窓開放併用でも 33°C の時の 0.256、扇風機&エアコン冷房併用では 32°C の時の 0.156 であった。

以上のことから、扇風機の単独使用と併用の環境調整行動モデルの算出にあたり、ロジスティック関数を選択し、その関数の収束値を変更することにした。

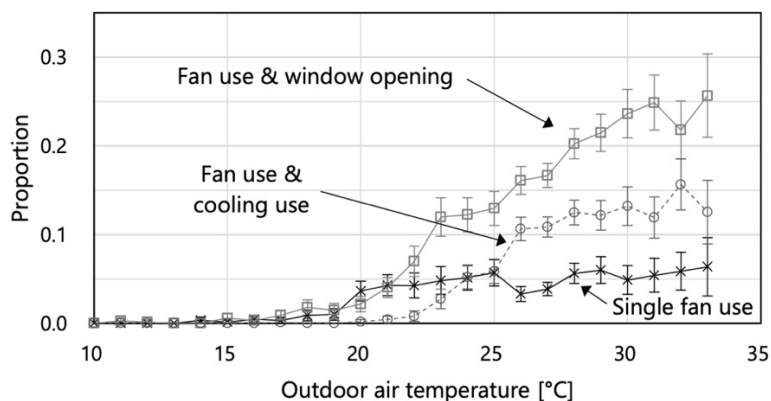


Figure 3.8 Observed proportion of single or combined fan use for the ranges of 1°C bin of outdoor air temperature (Mean ± 2 S.E.)

3.4.3 計算手法

扇風機の単独使用・併用のモデルの算出方法について説明する。一般的な環境調整行動モデルで利用されているロジスティック関数では、最大行動割合が限りなく 1 に近い値になるような特性を持っているが、前述の通り、各々の単独使用・併用ケースで収束割合が異なる傾向がみられた。本研究では以下の式を用いることで、式(2.1)の一次関数を用いたロジスティック関数の最大行動割合 c を調整できるようにした。

$$P = cP_a \tag{3.14}$$

$$\text{logit}(P_a) = a + bT \tag{3.15}$$

c は収束傾向を示す環境調整行動割合である。例えば、前節で述べた扇風機&エアコン併用の最大割合である 0.156 を c に設定することで、0.156 に向かって収束する傾向を持つロジスティック曲線に調整することができる。

ただし、環境調整行動割合の最大値が非常に小さい場合、ロジスティック関数よりも単純な式を用いることも可能である。例えば図 3.8 で示したように、扇風機単独使用の割合は、外気温 18~19°C でわずかに上昇し、20°C 以上では約 0.05 に分布する傾向であった。扇風機の単独使用の割合を約 0.05 で一定と考えると、外気温の 20°C 未満では 0、20°C 以上では約 0.05 となり、0 から 0.05 という割合値の間のなだらかな遷移は必ずしも必要ではないことが考えられる。このことから、本研究において扇風機単独使用のモデル化にはロジスティック関数だけでなく、ステップ関数 (83) も用いて分析する。ステップ関数は以下のよう示される。

$$\text{For } T_o < T_{o\text{Transit}}, \quad P = P_{\text{StepA}} \tag{3.16}$$

$$\text{For } T_{o\text{Transit}} \leq T_o, \quad P = P_{\text{StepB}} \tag{3.17}$$

ここで、 P_{StepA} と P_{StepB} には、任意の環境調整行動割合が設定される。これら任意の割合は統計的に決定される。ただし、 P_{StepA} と P_{StepB} のどちらか一方が 0 の場合は、もう一方は 0 とならない。また、環境調整行動割合として算出するため、 P_{StepA} と P_{StepB} のどちらも 0 よ

り高く1未満である。 $T_{oTransit}$ は行動割合が P_{StepA} から P_{StepB} へ遷移する外気温[°C]である。なお、ロジスティック関数とステップ関数のどちらにおいても、説明変数には外気温を設定する。

3.4.4 扇風機の単独使用・併用のモデルの算出

節3.4.2で得られた実際の扇風機使用割合を基にして、扇風機の単独使用と併用の環境調整行動モデルを算出する。図3.9に、扇風機の単独使用と窓開放またはエアコン冷房との併用の割合と外気温の関係性について、実際の割合と得られた数理モデルを示す。得られた回帰式は次の通りである。

扇風機単独使用(ステップ関数)

$$\text{For } T_o < 20, \quad P_{SF} = 0 \quad (3.18)$$

$$\text{For } 20 \leq T_o, \quad P_{SF} = 0.046 \quad (3.19)$$

扇風機単独使用 (ロジスティック関数)

$$P_{FW} = 0.064 P_{aFW} \quad (3.20)$$

$$\text{logit}(P_{aFW}) = 0.292 T_o - 6.3 \quad (3.21)$$

扇風機と窓開放の併用

$$P_{FW} = 0.256 P_{aFW} \quad (3.22)$$

$$\text{logit}(P_{aFW}) = 0.389 T_o - 9.7 \quad (3.23)$$

扇風機とエアコン冷房の併用

$$P_{FC} = 0.157 P_{aFC} \quad (3.24)$$

$$\text{logit}(P_{aFC}) = 0.396 T_o - 10.7 \quad (3.25)$$

P_{SF} は扇風機単独使用の割合、 P_{FW} は扇風機&窓開放併用割合、 P_{aFW} は扇風機&窓開放併用の調整割合、 P_{FC} は扇風機&エアコン冷房併用割合、 P_{aFC} は扇風機&エアコン冷房併用の調整割合である。これらの回帰式に外気温を代入すると、その外気温帯に応じたそれぞれの扇風機の頻度を比較することができる。例えば、季節遷移期に相当する外気温 T_o に 22°C を代入すると、扇風機単独使用と併用割合はそれぞれ P_{SF} で 0.046、 P_{FW} で 0.062、 P_{FC} で 0.019 となる。つまり、扇風機&エアコン冷房併用よりも扇風機単独や扇風機&窓開放の割合の方が高く、居住者は室内対流による採涼行動を優先して実施していることが分かった。しかし、外気温が8月の平均外気温である 28.6°C にまで上昇すると、それぞれの割合は P_{SF} で 0.046、 P_{FW} で 0.212、 P_{FC} で 0.102 に変化する。それぞれの扇風機併用割合は単独使用よりも2倍以上多くなることが明らかとなった。これは季節遷移期相当である外気温が 22°C の時と異なる傾向である。

以上のことから、算出されたモデルを用いて分析をすると、高外気温帯に達する夏季では、扇風機は窓開放やエアコン冷房と併用して使用されていることが明らかとなった。坪田らの先行研究[62]においても同様に、扇風機は単独使用よりも併用が多いことが明らかである。しかし、外気温帯が春季や周期に相当する約 20~24°C を確認すると、扇風機&エ

コン冷房併用よりも扇風機単独使用の割合の方が高くなっている。この理由としては、節2.7の図2.10でも示した通り、エアコン冷房が発現し始める時期が窓開放や扇風機よりも遅いため、春季・秋季と考えられる外気温帯約20~24°Cではエアコン冷房との併用割合も少ないことが考えられた。

以上のことから本節では、扇風機の単独使用及び窓開放やエアコンとの併用の3パターンについて、外気温を説明変数とした環境調整行動モデルの算出を行なった。一方で、居住者の行動傾向を十分に解明するためには、扇風機以外の単独使用も比較対象に含めて考察する必要がある。そこで次の節では、本節で得られた扇風機単独使用・併用モデルを、窓開放・エアコン冷暖房併用モデルへの統合を検討する。

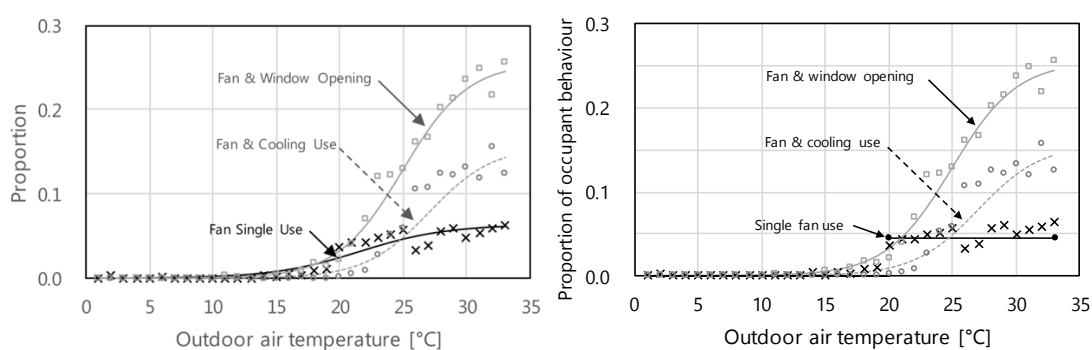


Figure 3.9 The regression models of single or combined fan use explained by outdoor air temperature

3.4.5 扇風機の単独使用・併用の統合

(a) 窓開放/エアコン使用モデルの統合モデルの改良

窓開放/エアコン冷暖房使用モデルへ扇風機使用も統合を行うために、窓開放/エアコン冷暖房使用の統合モデルを用意する必要がある。窓開放・エアコン冷暖房使用の統合モデルは節3.3で既に算出しているが、各々の最大環境調整行動割合が約1.00でない数値で収束傾向を持っていたため、観測割合と回帰式の割合の間の誤差が大きくなってしまっていた。これらの回帰式を基に得られた統合モデルは図3.6であるが、夏季相当の外気温帯ではエアコン冷暖房も窓開放も行わないケースの割合 P_{WCFR} が非常に小さくなっており、ここに式(3.18)~式(3.20)である扇風機単独使用割合を当てはめようとする、環境調整行動割合が1.00を超えてしまい、矛盾が生じる。このことから、窓開放・エアコン冷暖房使用のモデル統合にも、前述の式(3.14)と式(3.15)を用いて算出を行うことで、扇風機単独使用モデルの統合を可能にする。

FRモードの窓開放とエアコン冷暖房使用のモデルを算出しなおしたところ、次の回帰式が得られた。

$$P_{WFR} = 0.785 P_{aWFR} \tag{3.26}$$

$$\text{logit}(P_{aWFR}) = 0.330 T_o - 6.3 \tag{3.27}$$

$$P_{CL}=0.520P_{aCL} \quad (3.28)$$

$$\text{logit}(P_{aCL})=0.397T_o-9.9 \quad (3.29)$$

$$P_{HT}=0.481P_{aHT} \quad (3.30)$$

$$\text{logit}(P_{aHT})=-0.379T_o+3.6 \quad (3.31)$$

ここで、 P_{aWFR} はFRモードにおける窓開放の調整割合、 P_{aCL} はエアコン冷房使用の調整割合、 P_{aHT} はエアコン暖房使用の調整割合である。また、図3.10には各環境調整行動の観測割合と得られた回帰線をそれぞれ示す。回帰線を見ると、図3.6で得られた回帰モデルよりもフィットしていることが確認できる。このことから、今回新たに算出したこれらの回帰式を用いて、窓開閉/エアコン冷暖房使用の統合モデルの算出を行う。図3.11に統合された窓開閉/エアコン冷暖房使用モデルを示す。この統合モデルからも、関東地域の住宅の居住者たちは、窓開閉やエアコン冷暖房使用を年間を通して切り替えて生活を送っていることが確認できた。図3.11の統合モデル上における特徴的な外気温を表3.5にまとめた。例えば、外気温が17.3°Cの時にエアコン冷房使用とエアコン暖房の使用割合が同じとなり、これより低い外気温になるとエアコン暖房の方が、反対に高い外気温になるとエアコン冷房の方が使用頻度が多くなることがわかった。また、外気温が17.2°Cの時にはエアコン冷暖房不使用時の窓閉鎖割合が最も大きくなった。ただし、外気温が17.3°Cの時には窓開放割合は最大ではなく、外気温が23.6°Cまで上昇すると最大窓開放割合の0.52となった。これはつまり、23.6°C前後の季節遷移期においては約半数のケースで窓開放を実施していることを意味する。さらに、外気温が28.9°Cまで上昇すると、窓開放割合とエアコン冷房使用割合がともに0.43となる。この窓開放とエアコン冷房の関係性について、外気温が28.9°Cよりも高くなるとエアコン冷房割合の方が高くなり、反対に28.9°Cよりも低くなると窓開放割合の方が高くなっていた。

以上の結果をまとめると、居住者達は次のような季節に応じた環境調整行動の切り替えを行っていたと考えられる。

- 1) 冬季には暖房を使用
- 2) 季節遷移期には窓閉鎖を行うが、エアコンも使用しない
- 3) 季節遷移期の内、外気温が比較的高い時期はエアコン冷房ではなく窓開放を実施
- 4) 暑熱期では窓を閉鎖してエアコン冷房を使用する機会が増加

ただし、これらをもみても明らかなように、扇風機使用についてはまだモデル統合が達成していないため、扇風機の使用時期を理解することはできない。したがって次節では、既に求めてある扇風機単独使用/併用モデルを用いてモデル統合を行い、窓開閉とエアコン冷暖房使用、扇風機使用の行動を比較する。

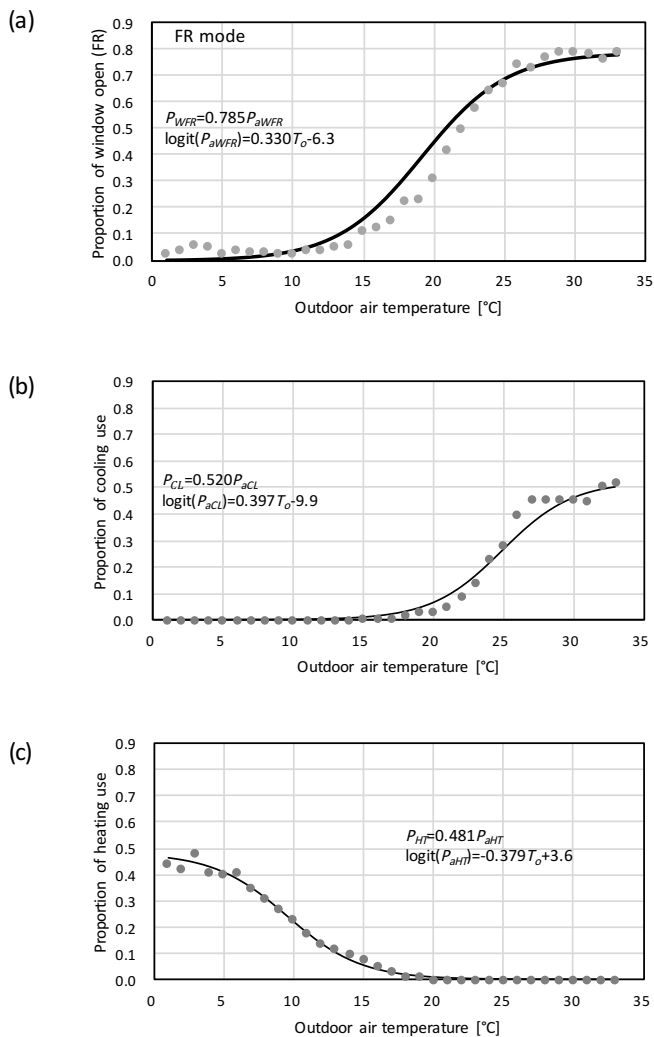


Figure 3.10 The stochastic models of each occupants' behaviours explained by outdoor air temperature using modified logistic function.

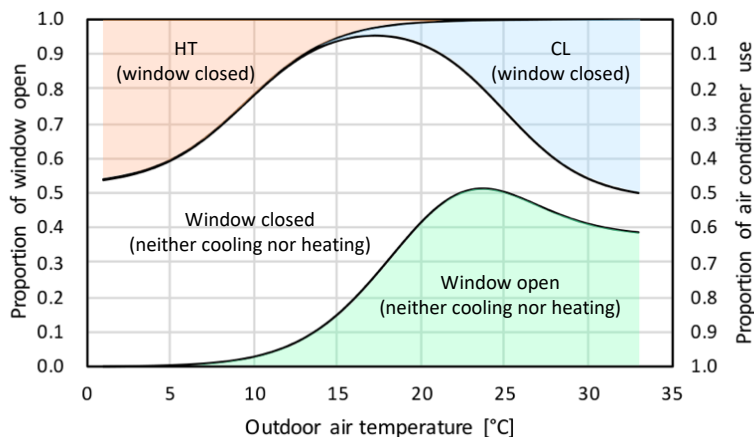


Figure 3.11 Integrated window open, cooling use and heating use model

Table 3.5 The distinctive points of the window/AC integrated model

T_o [°C]	Proportion
13.1	$P_{WCFRmax}^*=0.81$
17.2	$P_{FRmax}=0.95$
17.3	$P_{HT}=P_{CL}=0.02$
23.6	$P_{Wmax}=0.52$
28.9	$P_W=P_{CL}=0.43$

*The maximum proportion of window closed excepted with AC use

(b) 扇風機使用モデルの統合

季節変動に応じて、居住者の行動パターンを相対的に解明するために、扇風機使用行動を前述の統合モデルへの統合を試みる。図 3.12 に、窓開閉/エアコン冷暖房の統合モデルへの扇風機使用モデルの統合のプロセスを示す。

最初に、扇風機単独使用について、モデル統合を行う。扇風機単独使用のモデルは既に式(3.18)、式(3.19)で算出した通りである。この式を「FR モードにおける窓閉鎖割合」として統合を行う。扇風機単独割合と FR モードにおける窓閉鎖時の扇風機不使用割合を比較すると、非常に少ない。しかし、外気温が高くなるにつれて、扇風機単独使用と FR モードにおける窓閉鎖時の扇風機不使用割合は同等になっていく。この外気温上昇に応じた「FR モードにおける窓閉鎖時の扇風機不使用割合」の減少は、夏季における採涼行動が居住者にとって必要であることを意味する。

次に、式(3.22)(3.23)で示した扇風機使用&窓開放のモデルを統合する。統合した結果、外気温が 29.1°C の時において、FR モードの窓開放時には扇風機使用割合と不使用割合がともに 0.214 となった。また、外気温が 29.1°C よりも高くなると扇風機使用&窓開放併用割合の方が高くなり、反対に 29.1°C よりも低くなると扇風機使用&窓開放併用割合の方が低くなった。扇風機使用&窓開放併用のケースは、自然換気のみではなく、扇風機による人工的な対流も含まれる。そのため、自然換気と人工的対流の選択は季節変動に対応して切り替えていることを意味する。いずれにしろ、季節遷移期における対流を利用した採涼行動は日本の住宅において重要であることと関係する。

最後に式(3.24)(3.25)で示した扇風機&エアコン冷房併用モデルを統合する。統合した結果、どの外気温帯においても扇風機&エアコン冷房併用割合はエアコン冷房単独使用割合よりも少ないことがわかった。また、これらの割合差は外気温が上昇するほど大きくなる傾向でもある。これはつまり、エアコン冷房使用時には扇風機を併用するよりも単独で使用するの方が好んでいることが推測できる。また、エアコン冷房は設定温度を低下させ

る選択肢もあることから、エアコン冷房使用時に扇風機を併用することは少ないことも推測される。

これら3ステップの統合プロセスを通して、扇風機使用を窓開閉/エアコン冷暖房統合モデルへ統合することができた。そのため、これらの各環境調整行動の頻度の違いを比較することができるようになった。

前節をみると、外気温の上昇に対して、窓開放割合は 23.6°C までは上昇傾向を示し、 23.6°C 以上になると減少傾向に転じることがわかっている(表 3.5)。しかし、扇風機使用&窓開放併用割合では上昇傾向のみを示していた。これらは、居住者達は熱的にも暑くなる夏季では自然換気時においても風速の高い室内対流も必要としていたことを意味する。窓開放時においても風速の高い室内対流を得るためには、扇風機を使用することは有効な手段の一つである。これらの環境調整行動パターンにおいて、「扇風機単独使用」および「窓開放のみ」「窓開放&扇風機併用」の3パターンについては「対流の強化による採涼行動」と考えることができ、これは図 3.12 の Step4 の真ん中の点線より以下のエリアとして表現される。すると、外気温が 23.6°C より高くなると「対流の強化による採涼行動」の割合は減少することがわかる。窓開放割合はガウス関数のような傾向になるのに対して、扇風機単独使用割合も含めて「対流の強化による採涼行動」と考えると、外気温上昇に対して増加傾向を示すと考えられたが、実際には扇風機単独使用割合がステップ関数のような一定傾向であったため、同様にガウス関数のような傾向となった。これはつまり、夏季のような暑熱期に近づくにつれて、エアコン冷房使用のような空気温度自体も調整する環境調整行動の重要性も上がることを意味すると考えられる。

ここで、今回得られた統合モデル(図 3.12)の扇風機モデルと、その他の行動を考慮しない一般的な扇風機モデルを比較したい。同じく回帰分析を用いて得られた一般的な扇風機使用モデルを分析したところ、以下の式が得られた。

$$P_F = 0.430 P_{aF} \quad (3.32)$$

$$\text{logit}(P_{aF}) = 0.322 T_o - 7.3 \quad (3.33)$$

また、得られた扇風機使用モデルを図 3.13 に示す。図 3.13 をみても明らかな通り、一般的な扇風機モデルでは外気温上昇に応じて扇風機使用割合も増加傾向を示すのみである。一方で、図 3.9 の扇風機単独使用モデルでは使用割合の増加傾向はほとんどなく、単独使用割合よりも併用割合の方が多かった。これはつまり、関東の居住者において扇風機は他の行動と併用することが多く、併用可能性を考慮した扇風機の研究を行う必要があることを示していると思われる。

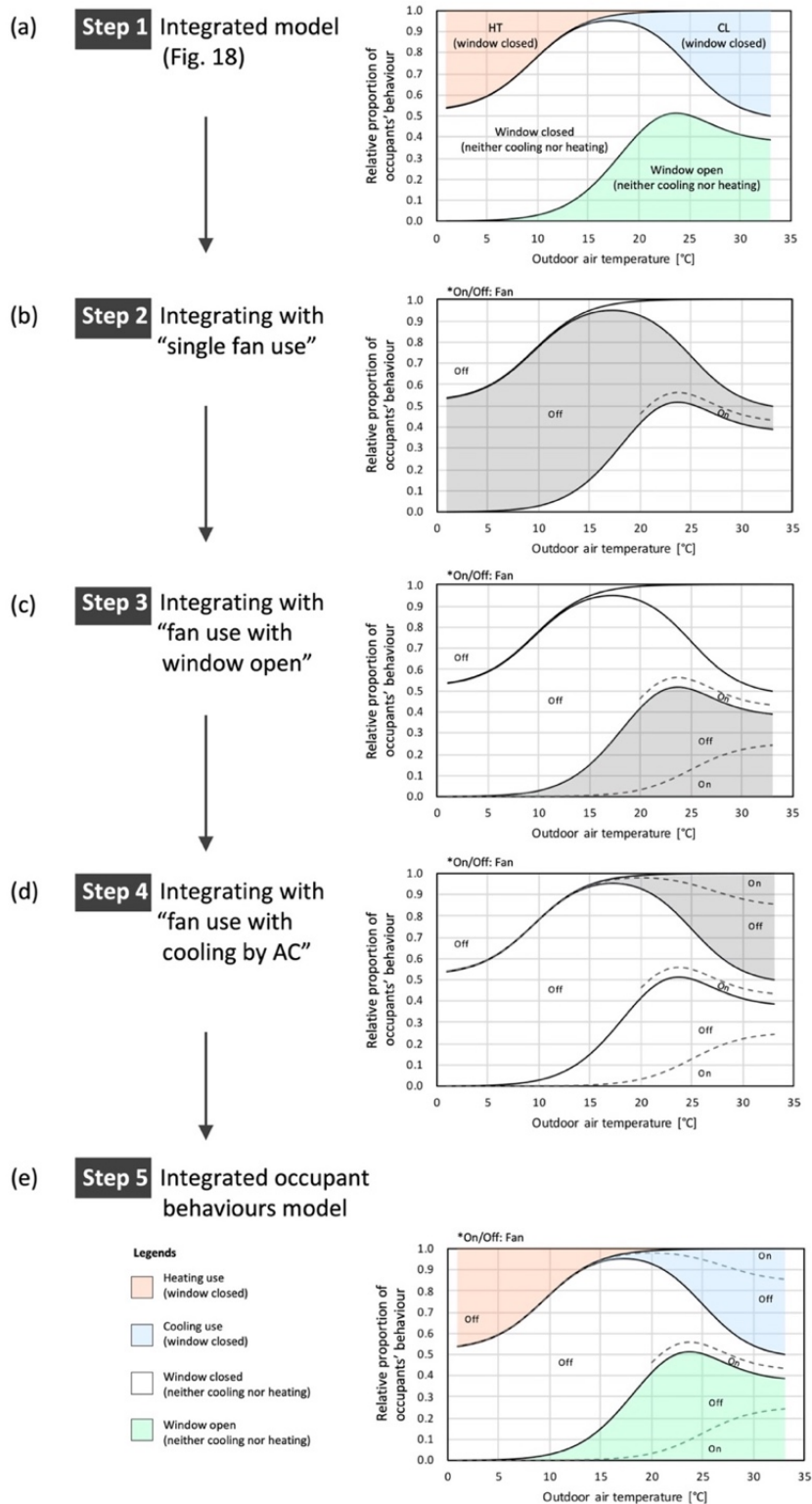


Figure 3.12 Development of integrated behaviour model. (a) is the previous method (Figure 3.11), three steps from (b) to (d) represent the developing process of the model incorporated with fan use, and (e) is integrated occupant behaviour model.

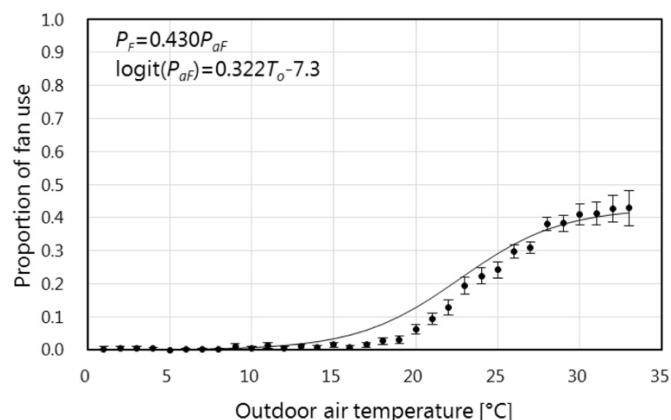


Figure 3.13 Relationship between the proportion of fan use and outdoor air temperature (Mean \pm 2 S.E.)

3.4.6 居住者行動の傾向

これまでの全体的な特性から、外気温が高くなるにつれて、窓開放や扇風機使用、エアコン冷房使用といった採涼行動の併用しながらも頻度が多くなることがわかった。そこで、エアコン冷房と扇風機、窓開放のどれか1つ以上を実行したケースを「採涼行動」とグルーピングを行なった上で、外気温に応じた「採暖行動」と「採涼行動」、「行動不実行」の3パターンの相対的割合の推移を図3.14に示す。季節遷移期である外気温19.9°Cでは採涼行動割合(P_{cb})は0.50に達していた。これは、採涼行動は暑熱期である夏季だけでなく、季節遷移期でも実施されていることを意味する。また、外気温が28.5°Cまで上昇すると採涼行動割合(P_{cb})は0.90にまで至った。これは、夏季において居住者は採涼行動を積極的に実施しており、日本の夏季の住宅において重要な習慣であることが明らかである。

図3.15には、本研究で得られた採涼行動割合の比率を先行研究[62]と比較したものを示す。なお、この先行研究は関東地域および山梨県の住宅を対象にした調査結果である。先行研究をみると、季節遷移期である外気温24°C前後では、窓開放割合が最も多い。しかし、外気温が夏季に向けて上昇するにつれて、窓開放&扇風機併用とエアコン冷房&扇風機併用、冷房単独使用の3パターンの割合が上昇していく傾向である。また、扇風機単独使用については外気温変動に対して一定の割合の傾向であり、他の行動よりも低い割合である。

全体的な傾向をみると、本研究で得られた採涼行動割合比率は先行研究と同等の傾向であると考えられる。これはつまり、本研究で得られた窓開閉/エアコン冷暖房/扇風機使用の統合モデル(図3.12)の信頼性は高いことが考えられる。

以上のことから節3.4では、扇風機の単独使用・併用についてモデル化を行い、扇風機は単独使用よりも併用される方が多いことが明らかになった。また、窓開閉・エアコン冷暖房・扇風機使用の統合モデルを算出したことで、関東の住宅における一般的な環境調整行動の行動実態を年間を通して定量的に評価できるようになった。例えば、採涼行動割合は外気温19.9°Cで0.50となり、28.5°Cまで上昇すると0.90にまで達することがわかる。

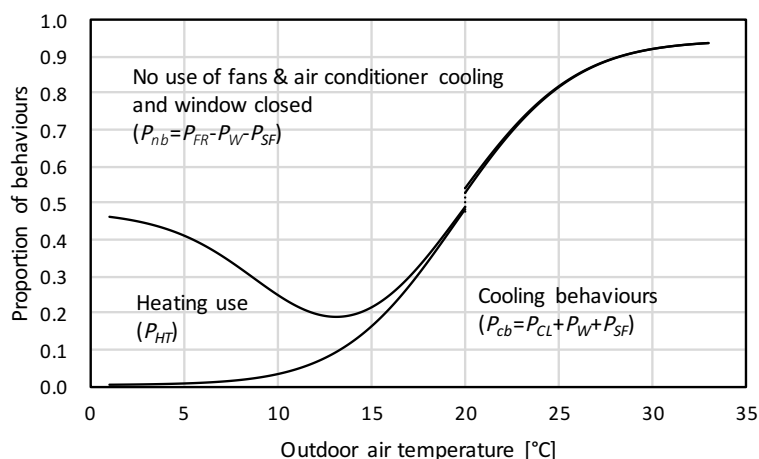


Figure 3.14 Relationship between the proportions of behavioural patterns and outdoor air temperature

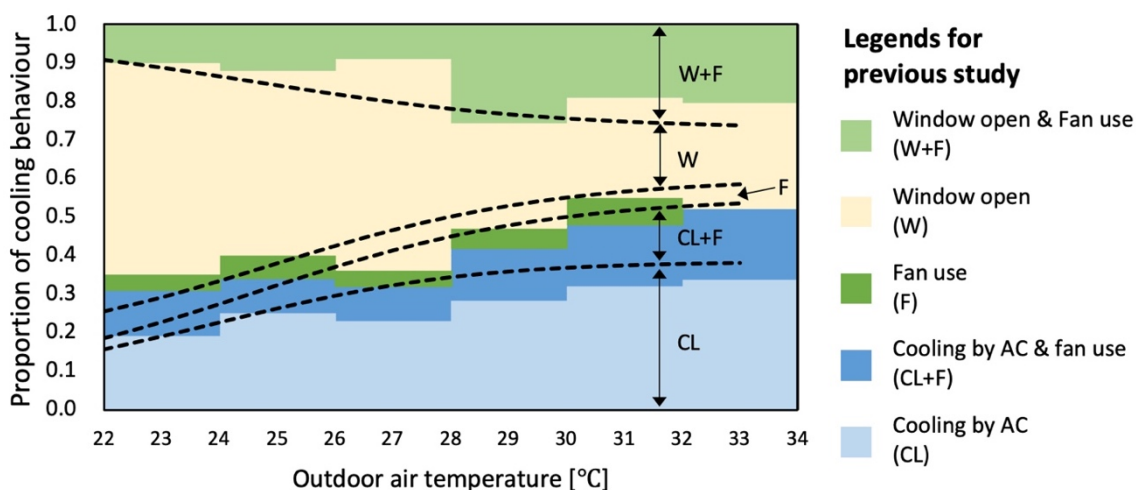


Figure 3.15 Comparison of relative cooling behaviour with previous study [62]. Each of the ranges, denoted by dashed lines represents the respective proportion of cooling behaviour, W+F, W, CL+F and CL in this study. Coloured areas shows the results of previous study in summer.

3.4.7 外気温時系列データに応じた年間の環境調整行動の推移のシミュレーション

以上より、窓開閉とエアコン冷暖房、扇風機使用の統合的なモデル(図 3.12)を算出することができた。実際の外気温変動の数値に対してこの統合モデルにおける同外気温数値との対応関係を用いると、外気温変動に応じて居住者行動の頻度がどのように変化したかを推測することができる。そこで、気象庁が公開する外気温測定値を用いて、各日の環境調整行動割合の図 3.16 に示す。なお、本節では横浜における日平均外気温を気象データとして用いた。

冬季ではエアコン暖房使用の使用・不使用が選択することが多いが、外気温が上昇し始める3月ごろからはエアコン暖房使用割合が減少する代わりに窓開放割合が増加する傾向にある。5月からはエアコン使用が開始され、扇風機の単独使用や窓開放との併用は5月中頃から一定割合で使用される傾向にある一方で、扇風機とエアコン冷房の併用は7月からの使用される傾向にある。7月から9月初旬まではほとんどの居住者が何かしらの採涼行動を実施している。9月にはエアコン冷房使用割合は減少傾向にあるが、窓開放や扇風機単独使用といった対流で涼しくなる採涼行動は一定傾向で使用がなされている。そして、10月下旬にはいるとこれらの対流による採涼行動も使用頻度が急激に減少しているが、これは外気温変動の傾きが急激であったためと考えられる。そして、11月からエアコン暖房の使用頻度が上昇していく。

全体的な傾向をみてみると、外気温が高い7~9月では非常に多くの環境調整行動を居住者たちは実施していたことがわかる。また、エアコン冷暖房使用とともに、各月ごとに割合が変動する傾向にあるのに対して、窓開放や扇風機単独使用といった対流による採涼行動は、5月中旬から10月初旬にかけて取り組む居住者が一定割合の傾向で存在することがわかった。

また、この節からは、環境調整行動の統合モデルに実際の外気温測定値を適用することで、実施される環境調整行動の居住者あたりの割合を推測できることが明らかとなった。環境調整行動モデルを実際の外気温変動値と対応づけることで、居住者行動をシミュレーションでき、エネルギー使用可能性の予測などに利用できることも考えられる。

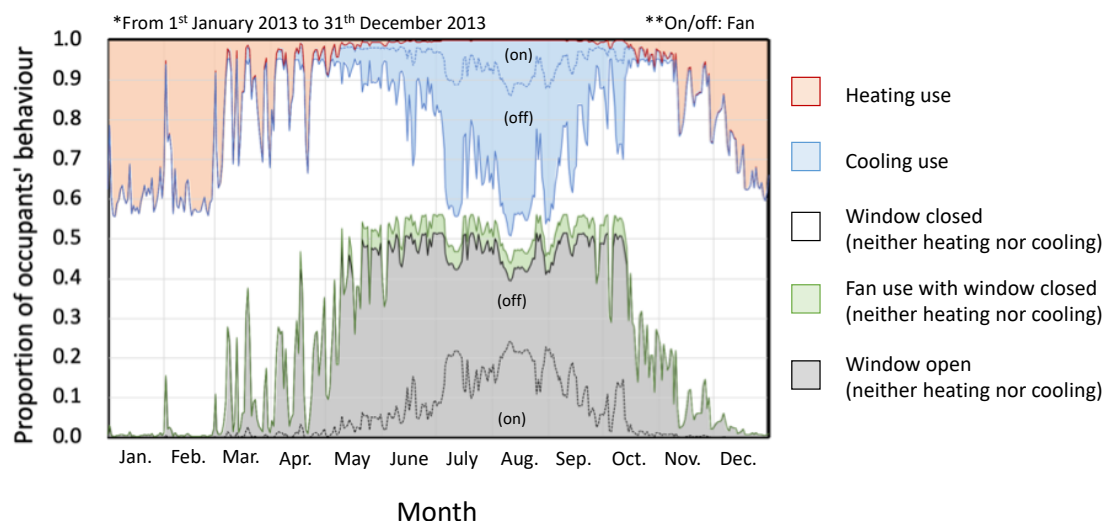


Figure 3.16 proportion of occupants' behaviour calculated for each day. The proportions of occupant behaviour were calculated using integrated model (Figure 3.12) and outdoor air temperature variation of each day in Yokohama [75]

3.5 その他の環境調整行動要素の傾向の把握

図 3.12 では、窓開閉とエアコン冷暖房、扇風機使用の計 4 種の環境設備の使用状況を統合的な数理モデルとして算出した。しかし、日本の住宅においては、着衣の調整による熱的快適性の調整も選択肢の一つである。着衣は一般的に誰でも調整ができ、人体からも最も近い環境調整行動の手段であるため、住宅の実態解明に重要な要素である。

また、図 3.12 ではエアコン冷暖房の使用頻度も数理モデル化しているが、使用時の設定温度については言及がされていない。もし、外気温変動に応じてエアコン冷暖房設定温度も変更されているのであるならば、これは図 3.12 の統合モデルへ統合できる要素と考えられる。

以上を踏まえて、本節では着衣量およびエアコン冷房・暖房の設定温度について、気温変動との対応関係を明らかにし、図 3.12 の統合モデルへの統合可能性を検討する。

3.5.1 エアコン冷暖房/窓開閉に応じた着衣量の傾向

(a) 各月の平均着衣量

居住者が年間を通してどのように着衣調整を行っているのかを把握するため、図 3.17 に各月の平均着衣量を示す。平均着衣量の年間変動幅は、男性で約 0.55clo であるのに対し、女性では 0.66clo であり、女性の方が変動幅が大きい。また、3 月と 4 月以外では女性の方が有意に高い着衣量であり、年間を通して女性の方が着衣量は大きい傾向であった。特に、12 月～2 月の冬季では、性別差は約 0.2clo と大きくなる傾向であった。最も暑くなる 7 月～9 月では各月で同等の着衣量となり、その値は男性で約 0.28clo、女性で約 0.35clo であった。8 月が室内外ともに気温が最も高くなるため、8 月の着衣量は更に低くなることもあり得ると思われたが、実際は前後の月と同等の着衣量であった。この理由は、調整可能な着衣量の下限に達し、8 月にはその他の調整手法が加わるためと考えられる。

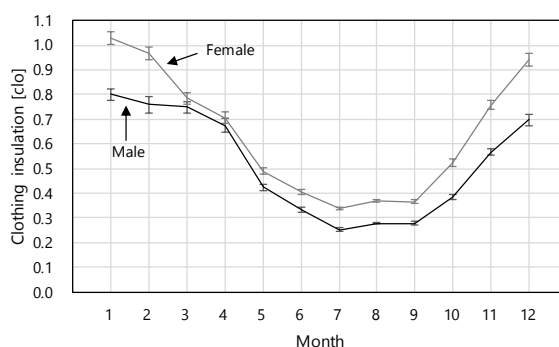


Figure3.17 各月の平均着衣量

(b) 着衣量と室内外気温の関係

環境調整行動モデルでは、説明変数に室内外の気温を設定することが多い。着衣量のモ

デル化でも気温を説明変数とすることを想定する。図 3.18 に着衣量と室内外気温の関係を示す。以下では、室内外気温を小数点第一位で四捨五入し、1K ごとに平均着衣量と 95%信頼区間を算出した値を示す。また、各平均値に対応するデータ数が 30 未満の場合は分析対象外とする。

室内外気温のどちらを使用した場合でも、気温が高くなると薄着となり、反対に気温が高くなると厚着となる傾向を示す。ただし、どの室内外気温帯でも一様に上昇・下降の傾向になるわけではなく、節 3.1 と同様に着衣量の下限值とみられる傾向があった。室内外気温の両者ともに約 25°C 以上では、男性が約 0.28clo、女性が約 0.35clo で一定傾向であり、これらがおおよその下限値と考えられる。この下限値の傾向は節 3.1 に示した 7 月～9 月と同等の傾向である。冬季についても同様の確認をしたところ、約 10°C 以下の外気温で着衣量が一定の傾向となることから、着衣量の上限值もあると考えられる。

室内気温に対しても以上と同様の確認を行うと、男性では 19°C よりも低くなると着衣量の上昇傾向はおちつく。ただし、17°C 未満では着衣量に変化が見られたが、これを説明できる男性に特有と考えられるような理由は見つからなかった。女性では 18°C 未満に対応する着衣量は有意差がなくなり、下限値に至る室内気温は男性よりも少し低かった。また、室内気温のケースでは、外気温のケースと比較すると、季節の遷移期に相当する 22～24°C で、着衣量の性別差が小さくなる傾向であった。

エラーバーの範囲を確認すると、どちらの性別でも、高外気温帯の方が範囲が狭く、低外気温帯になるにつれて広がって行く。これは、寒い時期では厚着の種類や度合いに個人差が現れるためと考えられる。この傾向は、男女のどちらでも現れていることから、冬の寒い時期には性差以外の居住者の好みなどの特性によって着衣量にばらつきが現れると考えられる。

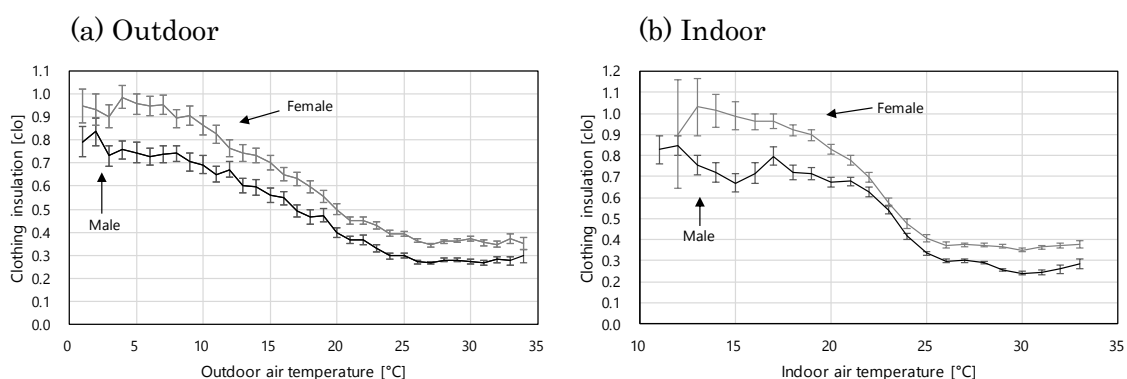


Figure 3.18 平均着衣量と室内外気温の関係

(c) 窓開閉とモードに応じた各月の平均着衣量

窓開閉や冷暖房の使用によって、居住者の着衣量がどのように異なるのかを知るために、図 3.19 に窓開閉やモードごとに算出した各月の着衣量を示す。FR モードの着衣量は年間

を通して大きく変動している。変動幅は男性で約 0.55clo、女性で約 0.64clo であり、これは図 3.17 で示したモード分けしないケースと同等の変動幅である。FR モードの窓開閉による着衣量の差は小さいが、男性の 5 月や 10 月、女性の 5 月や 9 月、10 月では窓開放時の方が着衣量が有意に低い傾向であった。窓開放は換気による室内発生熱の排出や人体近傍の気流速の上昇といった採涼手段と考えられるため、窓閉鎖時よりも着衣量が高くなると予想したが、逆の傾向となった。ただし、窓開閉による着衣量に有意な差が現れたのは、真夏に相当する 8 月ではなく、季節遷移期であった。季節遷移期は暑さの程度が変動しやすい時期と考えられるため、暑いときには着衣量の減少と窓開放の両方が同時に行われており、そのような習慣の結果として、図 3.19 が示すように窓開放時の方が着衣量が低めになったと考えられる。

FR モードの年間変動と比較して、エアコン使用時の着衣量変動幅は小さい。冷房使用時では、男性で約 0.25clo、女性で約 0.3clo で一定傾向であり、冷房使用時の着衣は習慣的に同様の組み合わせと考えられる。ただし、女性の 6 月と 10 月の着衣量では 95%信頼区間の範囲が少し広く、これは季節遷移期の冷房使用であるため、平均着衣量が同等であっても冷房使用による寒さによって、着衣量が少し高くなる居住者がいたためと思われる。

暖房使用時については、男性の 11 月～1 月にかけて着衣量が上昇傾向にあるが、1 月～4 月には有意な差はなく、一定傾向と考えられる他、女性では変動傾向はあるものの、FR モードの年間変動と比較すると狭い範囲である。また、11 月～1 月では女性の方が着衣量は高い傾向であり、その差の最大は 11 月の 0.33clo である。11 月～12 月の FR モードと冷房使用時の関係をみると、男性では有意な差はないが、女性では約 0.2clo の差がある。

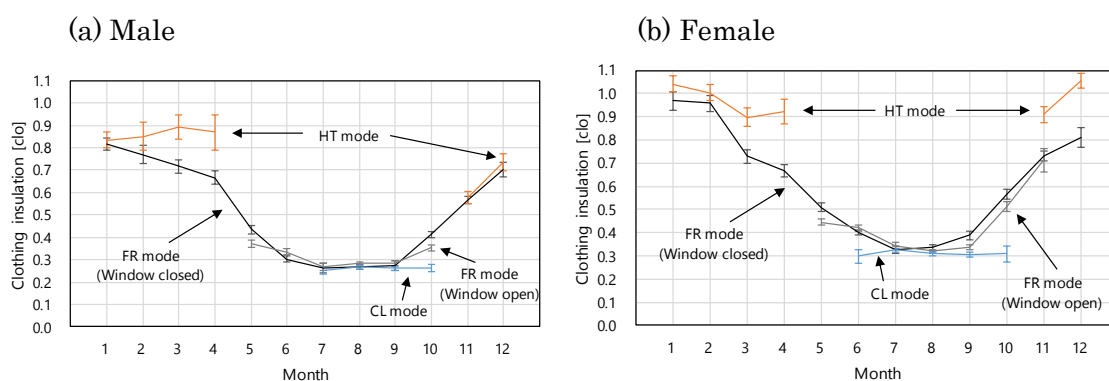


Figure 3.19 モードごとの各月の平均着衣量

(d) 窓開閉とモードに応じた着衣量と室内外気温の関係

(b)と同様に、実際に着衣量のモデル化を想定するため、図 3.20 と図 3.21 に窓開閉とモードに応じた着衣量と室内外気温の関係を示す。

(c)と同様に FR モードでは年間を通して大きく変動をするが、約 26°C以上では着衣量の下限値に達して一定傾向とみえる。また、9°C以下についても男子では 0.7~0.8clo で一定

傾向となり、女性においてもエラーバーの範囲を考慮すると上昇傾向はみられない。低外気温帯を確認すると女性ではエラーバーの範囲が約 0.2clo であり、男性よりも広い傾向であるが、これは居住者特性や個人の好みの差が関係したと考えられる。

暖房や冷房の使用時では、エラーバーの範囲を考慮するとどちらの性別でも差は小さいが、エラーバーの範囲は冷房使用時の方が暖房使用時よりも狭い。このことから、冷房使用時は着衣量が一定傾向であり、暖房使用時には個人差が現れていると考えられる。

室内気温のケース（図 3.21）でも、他の節と同様に FR モードでは、夏季や冬季の上下限があるものの、着衣量は年間を通して変動していた。また、FR モードにおける窓開閉で比較を行うと、24℃以上では有意な差はみられなかったが、23℃以下では有意な差がみられた。該当範囲は室内気温に応じて着衣量も変動する時期であることから、過渡期であるこのような季節では窓開閉による着衣量の違いがあると考えられる。

冷房使用時では、女性ほどの室内気温でも約 0.3clo で一定であった。一方、男性では 28℃以下で約 0.3clo であるのに対し、29℃以上では約 0.2clo とより低い値を推移している。この男女の違いは既往研究[84]が示す冷房温度毎の平均着衣量の推移と少し似ている。

また、季節遷移期では同等の室内気温でも FR モードと冷暖房使用時で着衣量は有意差がある。これは、居住者は季節遷移期において冷暖房を日常的に使わなくなる時期に移ると、着衣量が大きく変動するとも考えられ、人体への負荷が大きいかもしい。もし、季節遷移期の着衣量を冷暖房使用時と FR モード時で近似できる空調システムがあれば、冷暖房使用期から不使用期へ移行しやすくなると考えられる。

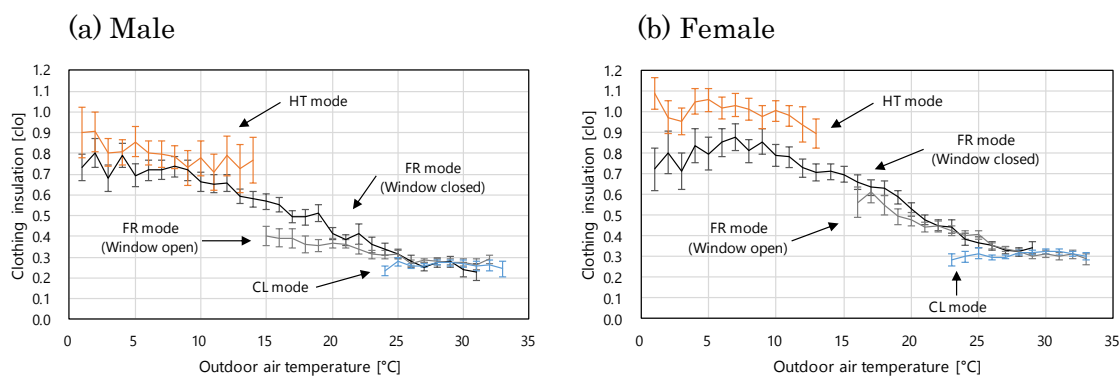


Figure 3.20 各モードの平均着衣量と外気温の関係

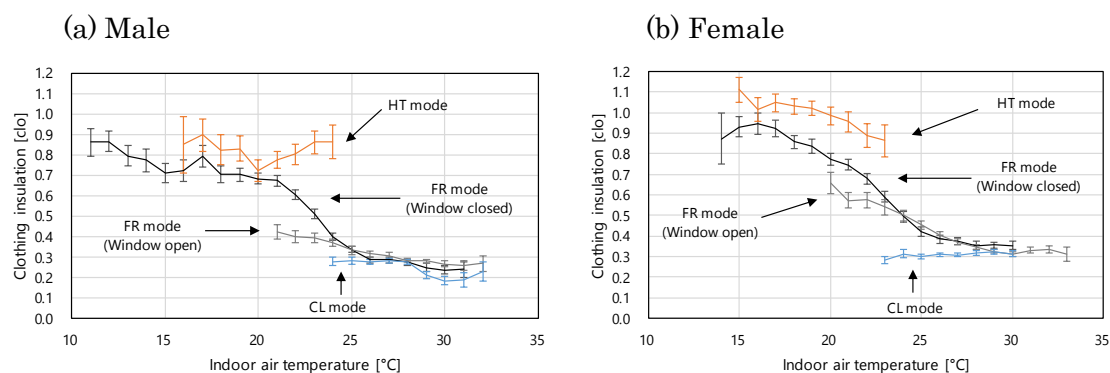


Figure 3.21 各モードの平均着衣量と室内気温の関係

3.5.2 エアコン冷暖房の設定温度の適応的選択性の検証

節 3.2 などで示した通り、居住者自身は年間を通して様々な環境調整行動を切り替えて適応的に生活をしている。そのため、エアコンの設定温度も外気温変動に応じて変更がされることも考えられる。もし、エアコンの設定温度の高低が季節変動に応じて変更されるとすれば、季節に応じたエアコン使用による環境形成が行われることになるため、これは適応快適性に包含されるべきことだと考えられる。

その一方で、設定温度は気温との相関関係があるか否かは不明であり、その関係性を説明した数理モデルは筆者の知る限りでは見当たらなかった。また、糸井川の研究[85]によると、冷房の「推奨室内温度」として認知されている 28°C[18]や「真夏日」とされる 30°C といった温度を見聞きすることにより、居住者のエアコン温度設定もそのような数値範囲に偏る可能性を述べている。また、冷房の On/Off は気温変動に応じて増減するが、設定温度にまでは配慮されておらず、いつでも一定のエアコン温度設定値とする居住者が存在することも考えられる。これらのことから、環境調整行動統合モデルで居住者行動の実態を解明する上では、設定温度と外気温の相関関係の有無も検討する必要がある。

従来の建築熱負荷シミュレーションでは、ある室内気温の目標値を 1 つ設定して運用する手法をとることがある。一方で、季節変動に応じて変化する外気温と同様にエアコン設定温度も変化するるのであるならば、室内設定温度も変化して居住者設定を行うことで、より現実的な行動設定を行うことができる。したがって、環境調整行動の統合モデルを作成する上で、エアコンの設定温度の傾向も考慮することは重要である。

そこで、本節ではエアコン設定温度の選択傾向について、外気温変動の対応関係を中心に解明を行い、設定温度のモデル統合可能性を検討する。

(a) 設定温度の分布

はじめに、どのような設定温度が選択されているのかを知る必要がある。図 3.22 に申告時のエアコンの設定温度の分布を示す。冷房設定温度は 26~28°C が多い傾向であった。最も多いのは 26°C であり、平均値も 26.4°C となった。一方、暖房では 20°C と 24°C の 2 つ

の離れた値が突出して多い。20°C の選択が多いのは、環境省による暖房時室温 20°C 設定というライフスタイル推進[18]が影響しているためと思われる。暖房設定温度は 20°C を中心とした正規分布にはなっていないが、これは、普段選択する設定温度が 20°C の居住者と 24°C の居住者とでは室温の好みに違いがあるためかもしれないと考えられる。

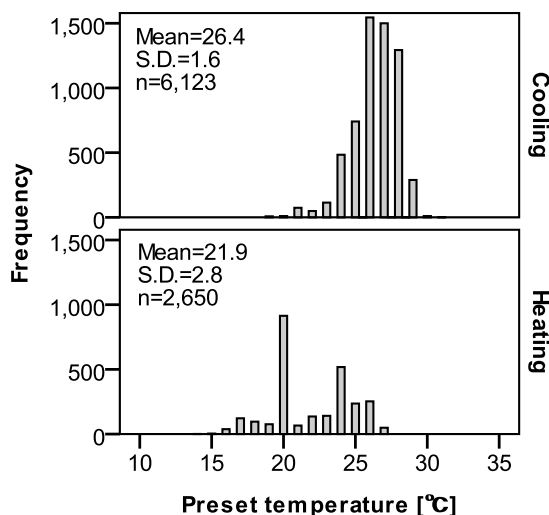


Figure 3.22 エアコンの設定温度の分布

(b) 冷房設定温度と外気温の関係

次に、エアコン設定温度の主要な決定要因が外気温変動であるかを確認するために、図 3.23 に冷房や暖房の設定温度と外気温の関係を示す。得られた回帰式は以下の通りである。

$$T_{PCL} = 0.126T_o + 22.8 \quad (n=6041, S.E.=0.007, R^2=0.046, p<0.001) \quad (3.34)$$

T_{PCL} : 冷房の設定温度[°C]、 n : 度数、 $S.E.$: 回帰係数に対する標準誤差[°C]、 p : 有意確率である。なお、暖房では有意な回帰式が得られなかった。

回帰線を見ると外気温上昇に応じて冷房設定温度も上昇する傾向を示しているが、設定温度の分布幅はかなり広い。決定係数の値が低いのはそのためである。加えて、冷房時申告全体の 71%に相当する設定温度 26~28°C に注目すると、外気温が 26~29°C の範囲に集中しており、外気温上昇に応じて設定温度は上昇しているようにはみえない。

暖房ではどの外気温帯でも設定温度は一樣に分布しており、外気温変動との相関はみられなかった。

以上のことから、エアコン設定温度は外気温変動に応じて変更しているとはいえない。これは、「気温以外のその他の要因の方が大きく寄与している」、もしくは「冷房設定温度の変更に関心がなく、いつも同じ設定温度で使用している居住者が存在する」ことを示唆していると考えられる。

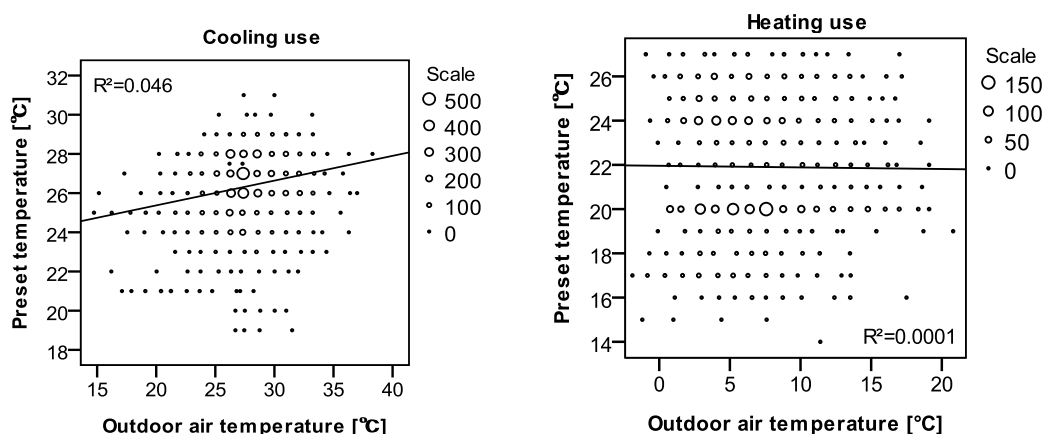


Figure 3.23 エアコンの設定温度と外気温の関係

(c) CL 設定温度の傾向による居住者のグルーピング

前節の(b)では、エアコン設定温度は外気温変動に応じて変更はされていなかった。この理由として、その他の要因による変更だけでなく、そもそも一定で使用している居住者がいる可能性が考えられた。そこで、各居住者ごとに申告したエアコン冷房の設定温度を確認し、「設定温度をよく変更する居住者」と「あまり変更しない居住者」に分類した上で、外気温変動との対応関係を確認することとした。そのための、設定温度傾向に応じた居住者のグルーピングを本節(c)で行う。

はじめに、申告された冷房設定温度の選択傾向を調べ、特徴的な選択傾向のある居住者を抽出する。そこで居住者ごとに冷房設定温度の分布を調べた。調査対象 244 人の内、冷房設定温度について、統計的に信頼性が確保されると考えられる 30 回以上の申告を行った居住者の 58 人が分析対象として抽出された。これらの設定温度分布を確認すると、①ある一意の設定値を非常によく申告していた居住者と、②いくつかの設定値を同じ頻度で申告していた居住者、更に③どちらとも言い切れない居住者の計 3 つのグループに分割できた。これらに対して、①グループはいつも同じ設定温度を使用し続けていたと考えられるため「固定型」(12 人)、②グループは複数の設定温度を変更して冷房運用していたと考えられることから「変更型」(13 人)とグループ名を付け、分析対象とした。なお、以降の分析において、③グループは分析対象から除外した。

(d) CL 設定温度の分布と割合

前節で分類した居住者グループごとの冷房設定温度のばらつきを明らかにするために、図 3.24 に各居住者グループの冷房設定温度の分布を示す。分布範囲ではどちらも幅広い設定温度が選択され、平均設定温度も同等である。しかし分布をみると固定型は 26°C に申告が偏るのに対して、変更型では固定型ほどの申告の偏りが大きくない。

これらの分布の偏りを割合値で表現したものを図 3.25 に示す。図 3.25 で確認すると、固定型の設定温度申告は 26°C が約 45% と多くを占めており、2 番目に多い 24°C の約 15% と比

較しても特に多いことが分かる。一方、変更型では最も多い27°C設定が約25%であり、2番目に多い28°Cともあまり変わらない。ただし、固定型では申告回数が多い居住者の設定温度に偏ることも考えられる。そのため、固定型の各居住者12人が最も多く申告していた設定温度を調べ、その設定温度の割合を図3.26に示す。ここでも26°Cの設定温度が最も多かった。つまり、特定の居住者の申告が多いのではなく、設定温度26°Cを固定的に選択した居住者の占める割合が大きいことが分かる。

これらを考慮すると、固定型と比較して変更型の方が設定温度の偏りが少ないため、外気温に応じて様々な設定温度に変更している可能性があると考えられる。

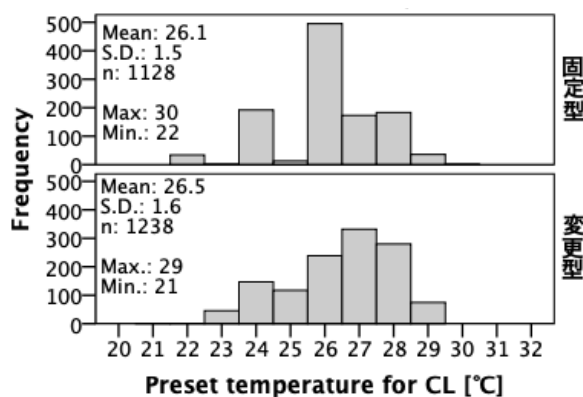


Figure 3.24 各居住者の選択傾向に応じたエアコン冷房設定温度の分布

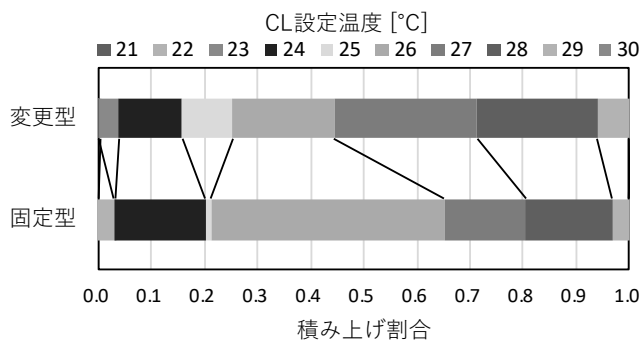


Figure 3.25 エアコン冷房の設定温度の申告割合

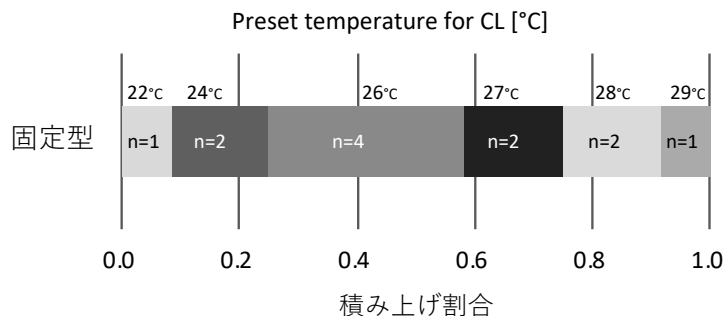


Figure 3.26 各固定型居住者の最頻冷房設定温度の割合

(e) CL 設定温度と外気温の関係

前節では、変更型の居住者の設定温度と外気温間に相関関係があると考えられた。変更型・固定型ごとに、設定温度と外気温の間に強い相関関係があれば、想定する居住者に応じた設定温度を決定することができる可能性がある。これを明らかにするために、図 3.27 に冷房設定温度とその時の外気温の関係を固定型・変更型ごとに示す。

分布をみると、どちらの居住者タイプも 25~30°C の外気温範囲の申告が多く、傾向を読み取るのは難しい。そこで、回帰分析を行ったところ、固定型では有意な回帰式が得られたのに対して、変更型では有意な回帰式が得られなかった。これは予想していた結果とは反対である。これについて、ある温度帯にデータが集中することでうまく回帰分析が行えなかった可能性もある。そこで、外気温 1K ごとの冷房設定温度の平均値と 2 標準誤差の範囲を図 3.28 に示す。図をみると、変更型における外気温変動に対応した上昇・下降の傾向はみられなかった。

これらのことから、変更型居住者の冷房設定温度の変更は外気温変動には対応していないことが明らかとなった。つまり、外気温以外の要因が関係すると考えられる。

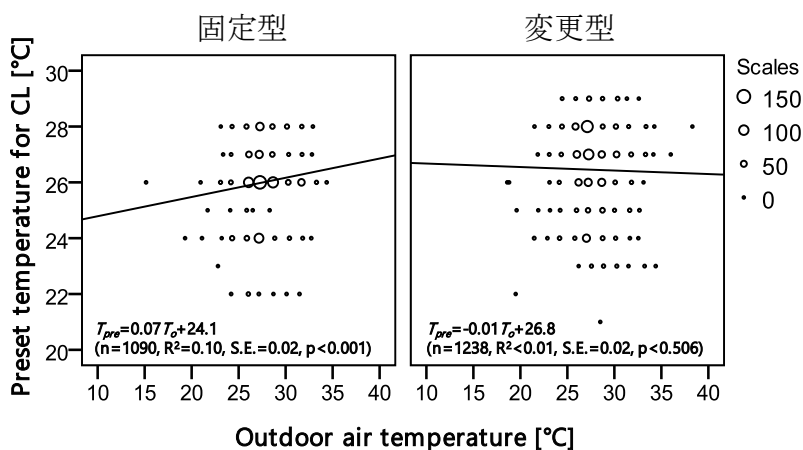


Figure 3.27 冷房設定温度と外気温の関係

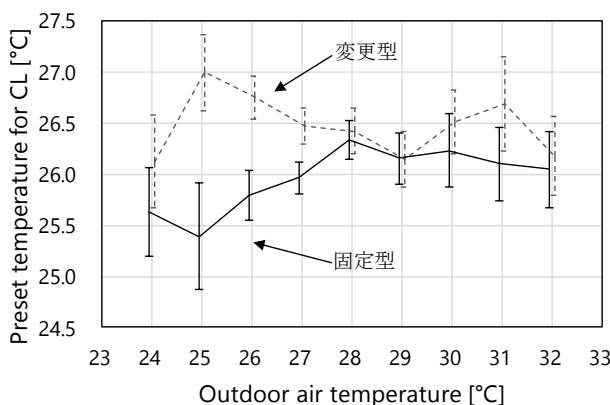


Figure 3.28 各外気温帯の平均冷房設定温度

(f) 各週の平均 CL 設定温度

しかし、変更型の居住者は冷房設定温度を季節変動に応じて変更しなかったのか。それを確かめるべく、各週の平均冷房設定温度と外気温を図 3.29 に示す。なお、申告時の日付と Excel の WEEKNUM 関数を用いて各週を定義した。図をみると 8 月後半である 35 週目以降では変更型の平均設定温度は高い傾向であった。この時期は外気温が低下し始める時期であり、変更型の居住者は涼しい時期に入ると設定温度傾向が変化するかもしれないと考えられる。

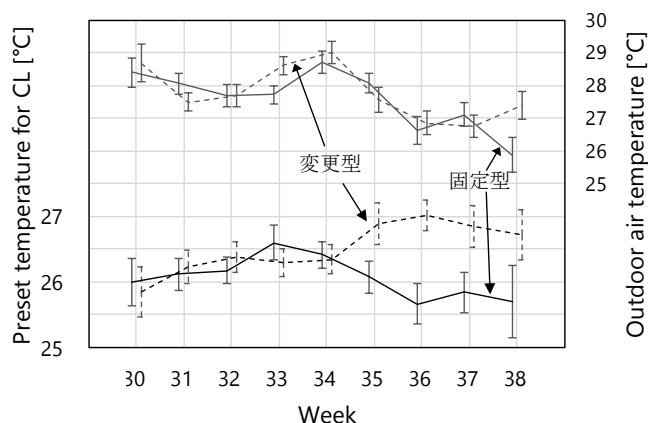


Figure 3.29 各週の平均冷房設定温度と外気温

3.5.3 着衣量およびエアコン設定温度のモデル統合可能性の検討

節 3.6 を通して、着衣量とエアコン設定温度について、窓開閉・エアコン冷暖房・扇風機使用統合モデルへ含有可能な要素の抽出を行う。

着衣量については、エアコン冷房使用時にはどの外気温帯であっても約 0.3clo で一定傾向が強いため、統合可能と思われる。ただし、図 3.21 で示す通り、室内気温が 29°C 以上では男性のみ着衣量がさらに低下し、0.2clo に達する傾向があることから、エアコン冷房使用時には室内気温も参照しながら着衣量との対応関係を記述する必要性が考えられた。エアコン不使用時の着衣量は外気温変動に応じて変更される傾向が春季・秋季にみられたが、窓の開閉状態による着衣量の違いは男性のみ確認された。ただし、室内気温変動で確認すると、窓開閉に応じた着衣量の差は約 17°C 付近で男女共にみられた。これらのことから、エアコン不使用時の着衣量は、外気温変動よりも室内気温変動を参照しながら記述する方が望ましいと考えられた。エアコン暖房使用時については、エアコン冷房使用時よりもエラーバーの範囲が広いことから、着衣量は個人ごとによってバラバラであることが考えられる。このことから、エアコン暖房使用時については、室内外気温以外の温熱環境値や居住者特性などを参照しながら記述すべきと考えられる。

エアコン設定温度については冷房設定温度では 26~28°C が、暖房設定温度では 20°C と 24°C が多く設定されており、設定温度値は幅広く選択されていなかった。外気温変動との

対応関係を回帰分析したが、強い相関関係は得られなかった。エアコン設定温度の傾向から、一定値をよく設定する居住者（固定型）が存在することが明らかとなった。また、設定温度をよく変更した居住者（変更型）の冷房設定温度と外気温の関係性も回帰分析を行なったが、有意な回帰が得られなかった。これらのことから、エアコン設定温度についてはモデル統合を行う時には、冷房時に26~28℃というように局所的な設定範囲の提示が可能であるが、より明快な決定要因を利用するには外気温以外のパラメータをはじめとするその他の要因も参照して設定する必要性が考えられた。この要因として考えられるものは、室内温熱環境や熱的快適性などの変動要因だけでなく、年齢層や性別・体質(暑がり・寒がり)・エアコンの好き嫌いなどの居住者特性も挙げられる。また、個人ごとの好みや生活スタイルといった、個人レベルでの設定温度傾向の差異も考えられ、この場合ではこれまでの生活環境の影響も考えられる。いずれにしろ、これらのように外気温変動以外の要因にも着目してエアコン設定温度の傾向を解明することは、居住者行動の解明に資するだろう。

以上をまとめると、着衣量についてはエアコン不使用時の窓開閉時や冷房使用時の着衣量はモデル統合の可能性がみられた。エアコン設定温度については外気温変動に応じて変更されておらず、26~28℃および20℃、24℃というような選択候補を行って統合するにとどまった。

3.6 まとめ

第3章では、日本の居住者にとって身近である環境調整行動のモデル統合を行い、相互関係性を考慮した居住者行動習慣の実体解明を試みた。本節では、以下の結論が得られた。

- 1) 「エアコン使用時は窓を閉鎖」する相互関係性を基に、窓開閉とエアコン冷暖房使用のモデルを統合することができた。
- 2) 扇風機は単独使用よりも窓開放やエアコン冷房と併用する方が多いことが明らかとなった。さらに、扇風機の単独使用・併用ごとにモデル算出を行ったことで、扇風機の併用可能性を定量的に評価できた。さらに得られたモデルも統合することで、窓開閉・エアコン冷暖房・扇風機使用の頻度を相対的に算出できる統合モデルの開発に至った。このモデルから、採涼行動割合は外気温19.9℃で0.50となり、28.5℃まで上昇すると0.90にまで達することが明らかとなった。
- 3) 着衣量についても前述の行動モデルへ統合可能性を検討した。平均着衣量はエアコン冷房使用時のどの外気温帯でも約0.3cloとなる傾向であったが、室内気温が29℃以上では男性は約0.2cloまで下がる傾向があった。冷房使用時では外気温だけでなく室内気温も参照して着衣量を記述する必要性が考えられた。また、エアコン不使用時には外気温低下に応じて着衣量も上昇傾向となるが、窓開放をしたときの方が男性の着衣量は低い傾向が示された。窓開閉制御との対応関係も考慮する必要性が考えられた。暖房使用時の着衣量は比較的ばらつきが大きかったため、居住者の他の温熱物理環境値や個人の好みなどのその他の影響要素を考慮する必要性が示唆された。

- 4) エアコン設定温度も分析したところ、外気温変動に応じて設定温度は変更されていない。設定温度の分布傾向から、設定温度を複数変更する「変更型」と一定値でよく使用する「固定型」居住者にグルーピングができた。しかし、変更型の居住者のデータでエアコン冷房設定温度と外気温の関係性をみたところ有意な回帰式が得られなかったため、エアコン冷房設定温度は外気温以外の変更要因があることが示唆された。

第4章 季節遷移を考慮した 環境調整行動モデルの検討

4.1 本章の概要

本章では、四季を持つ日本において、春季と秋季の違いを考慮した環境調整行動モデルの開発の必要性について考察する。周期的な季節変動を持つ多くの地域では、高温期と低温期の間にある季節遷移期がある。日本においては四季という周期的季節変動を持っており、寒い冬から暑い夏へ気温上昇していく間の「春季」、そして暑い夏から寒い冬へ気温低下していく間の「秋季」が含まれる。これら春季と秋季は同等の外気温帯と考えられるが、外気温の変動方向が異なっている。外気温を説明変数にした環境調整行動モデルには、この外気温変動の方向の差異は考慮されておらず、春季と秋季で同一値として扱うことが多いのが現状である。

4.2 では、季節変動を考慮した環境調整行動モデルの概念を述べる。

4.3 では、各季節ごとに環境調整行動モデルの算出を行う。

4.4 では、各月の環境調整行動割合や平均着衣量の算出を行い、室内外気温との対応関係を検討する。

4.5 では、季節変動の考慮が必要な行動に着目して、季節遷移を考慮した環境調整行動モデルを算出する。気温上昇期・下降期ごとにモデル化を行う。

4.6 では、前節までに得られた結果を基に、季節遷移の影響について環境調整行動モデルへ反映する必要性の有無を検討する。

4.7 では、本章のまとめを記する。

4.2 季節変動を考慮した環境調整行動モデルの概念

第3章では年間を通したデータを用いて、環境調整行動モデルの統合を行なった。この時に算出された図3.6について、15~20℃の外気温帯をみるとエアコンの暖房と冷房の使用割合が共に少ない割合でありつつも、使用されていることがわかる。しかし、環境調整行動の移り変わりは、エアコン暖房と冷房の間にはエアコン不使用時があるはずである。しかがって、15~20℃の範囲でエアコン冷暖房の両方が使用されていることは非現実的であると当初は考えられた。しかし、これらの外気温帯は同じ外気温値であっても、春季と秋季で居住者の環境調整行動が異なっているため、前述のようなエアコン冷房と暖房のどちらも使用される傾向を示したことが考えられた。この理由として、春とは「寒い冬からの気温上昇」でなるが、秋とは「暑い夏からの気温低下」でなるためであり、これらの履歴を考慮すると、同じ外気温でも人間の感じ方は異なることで、それに応じて形成される室内環境も異なっていたことが考えられる。加えて、夏は「どれだけ暑さを回避できるか」、冬は「どれだけ寒さを回避できるか」によって快適性が決まるが、各季節の境目がはっきりと決められない日本の気候では、秋には夏の、春には冬の快適性の考え方を引きずることも考えられる。以上のことから、一年間の環境調整行動と外気温の関係のモデルを分析する時は、春と秋で重なる外気温帯における環境調整行動の選択の季節差を考慮する必要もあることが考えられた。

そこで第4章では、春季と秋季の違いについて、環境調整行動だけでなく熱的快適性も対象として分析し、外気温を説明変数とする環境調整行動モデルに季節遷移期の差異を反映すべきであるかを検証する。

もし、季節遷移期の差異を適応的快適性へ反映すべきであるとした場合の、分析モデルの概念を、適応モデルと着衣量を例に図4.1に示している。居住者の熱的快適性が春季・秋季で異なる場合は、(a)の点線のように外気温の上昇期・下降期に応じて快適温度が異なってくるのが考えられる。これは(b)の着衣量モデルでも同様であり、限界着衣量である0.3cloなどでは差が小さいが、着衣量が大きく変化する春季と秋季では、春季・秋季で着衣量の差が比較的大きくなるのが考えられる。これらのように直線的でなく円形を描くような環境調整行動モデルの必要性について、検討を行う。

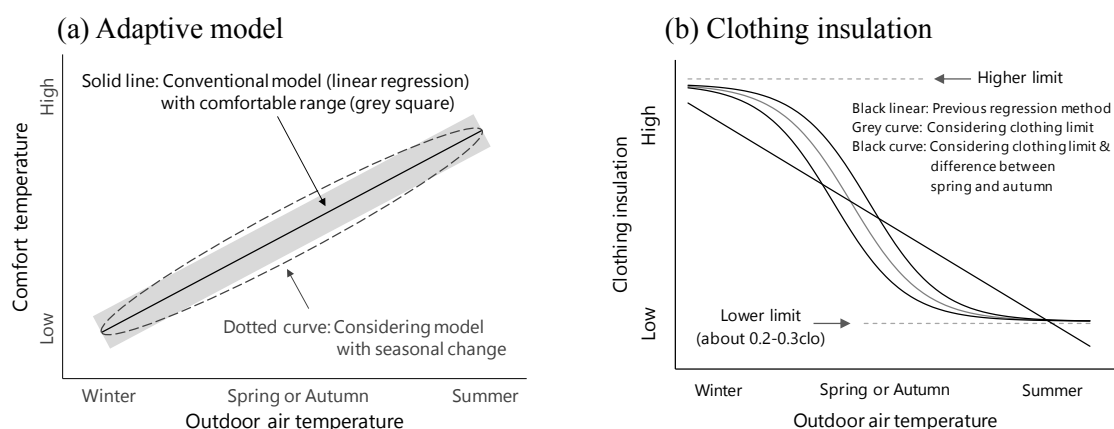


Figure 4.1 Concept of adaptive model and clothing adjustment model

4.3 各季節ごとの環境調整行動モデルの算出

はじめに、窓開閉・エアコン冷暖房の統合モデルを各季節ごとに算出して、春季と秋季の比較を行う。表4.1に得られたロジスティック回帰式を示す。ただし、夏の暖房使用及び冬の冷房使用は行われなかったため式を省略した他、冬の窓開放に対する回帰式は有意ではなかった。また、各季節の外気温範囲は、外気温を小数点第1位で四捨五入した値で改めて度数を整理し、各季節内における該当割合が0.5%以上の外気温(T_o Range)を分析対象とした。

得られた環境調整行動モデルの指揮を式(3.2)に当てはめることで、各季節の窓開閉・エアコン冷暖房使用モデルの算出を行なった。これによって得られた春季と秋季の環境調整行動と外気温の関係を図4.2に示す。また、春季と秋季の環境調整行動割合の差を図4.3に示す。ただし、外気温範囲は春秋のどちらにも該当する7~25℃となっている。図4.3においては、 $0 < P$ の場合は春季の方が高く、 $P < 0$ の場合に秋季の方が高いことを示す。

暖房使用はどちらも、外気温の低下に応じて増加する傾向がある。その割合は春季の方が少し高いが、その差は0.05未満と小さい。

冷房使用は秋季に比べて春季はほとんど使用傾向がない。そのため、春季と秋季の冷房

使用割合は外気温が高いほどその差が大きくなり、 25°C では0.24の差がある。また、それに影響して窓開放割合は、秋季では夏同様に外気温上昇に応じて上昇した後に低下する傾向が示されるが、春季では上昇傾向のみであった。このことから同等の外気温でも、春季では窓開放のみが選択されやすいのに対して、秋季では窓開放だけでなく冷房使用も選択される傾向があることが分かる。一方で、「涼しくしたい行動」である窓開放と冷房使用の割合を合算すると秋季の方が涼しくしたい環境調整行動の選択が多く、外気温が高いほどその差が大きくなり、 25°C で0.26の差となった。

以上のことから、涼しくしたい行動は秋季の方が、エアコン暖房使用は春季の方が使用頻度が多く、同じ外気温帯であっても季節遷移期の環境調整行動頻度は春季と秋季で異なる傾向であることがわかった。

表 4.1 環境調整行動と外気温の関係

Season	P	$\text{logit}(P)$	n	R^2	S.E.	T_o Range
All	P _W	$0.241T_o - 5.561$	25212	0.348	0.003	
	P _{CL}	$0.277T_o - 8.090$	34681	0.255	0.004	$1 \leq T_o \leq 33$
	P _{HT}	$-0.233T_o + 0.755$	30568	0.199	0.004	
Spring	P _W	$0.294T_o - 6.936$	5063	0.143	0.013	
	P _{CL}	$0.223T_o - 9.318$	5690	0.004	0.053	$3 \leq T_o \leq 25$
	P _{HT}	$-0.204T_o + 0.508$	5607	0.097	0.009	
Summer	P _W	$0.146T_o - 2.956$	8254	0.051	0.007	$19 \leq T_o \leq 34$
	P _{CL}	$0.184T_o - 5.515$	13030	0.068	0.007	
Autumn	P _W	$0.258T_o - 5.986$	8517	0.278	0.006	
	P _{CL}	$0.315T_o - 8.887$	10379	0.233	0.008	$7 \leq T_o \leq 32$
	P _{HT}	$-0.295T_o + 1.263$	9591	0.069	0.014	
Winter	P _W	$0.023T_o - 3.357$	3378	0.000	0.024	$0 \leq T_o \leq 14$
	P _{HT}	$-0.081T_o + 0.044$	5471	0.017	0.009	

※n:度数、 R^2 :決定係数、S.E.:回帰係数に対する標準誤差である。また、夏の暖房及び冬の冷房は使用が無かったため省略。

(b) 春季と秋季の比較

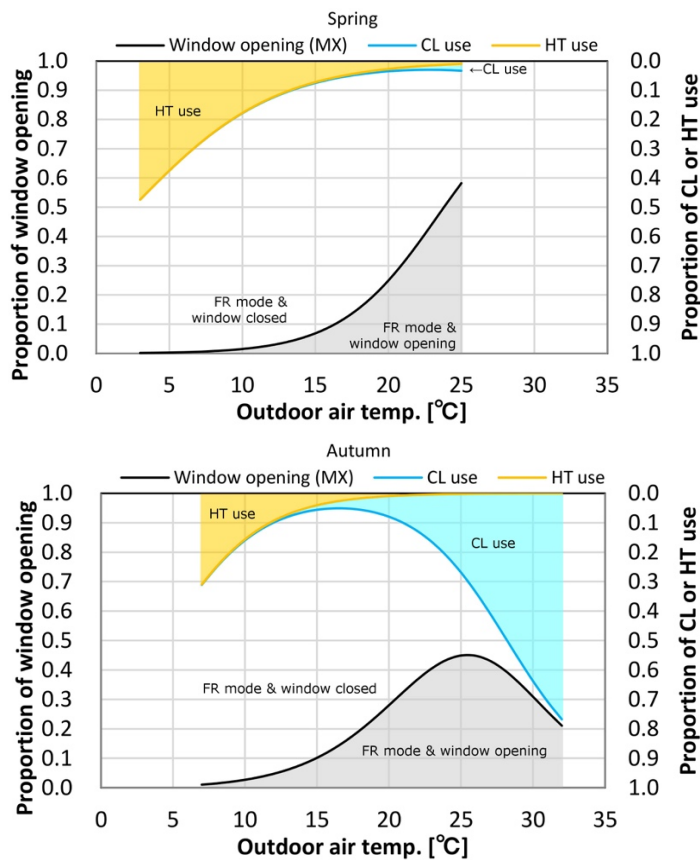


図 4.2 春季と秋季の環境調整行動と外気温の関係

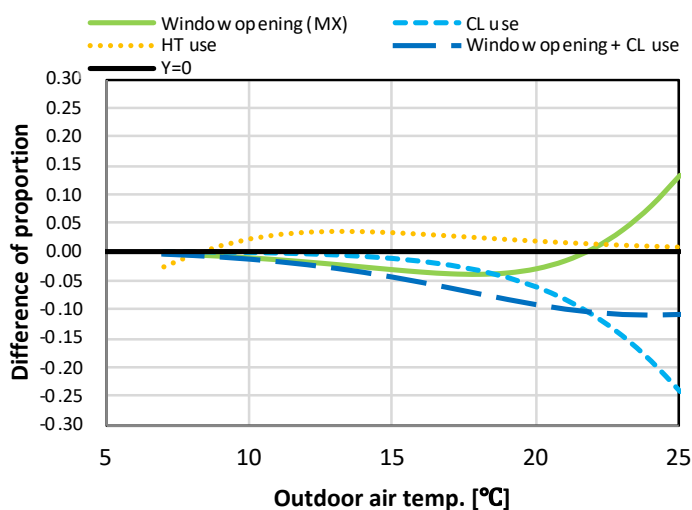


図 4.3 各季節の環境調整行動の割合

4.4 各月ごとの環境調整行動モデルの算出

前節では各季節で環境調整行動の比較をしたが、本節ではさらに詳細な分析を行うため、

各月の平均±2S.E を用いて比較を行う。はじめに、申告時の日移動平均外気温と室内気温、着衣量の各月の平均値を図 4.4 に示す。なお、日移動平均外気温は既往研究[86]を参考にし、以下の式を用いて算出した。

$$T_{rm} = \alpha T_{rm-1} + (1-\alpha) T_{od-1} \quad (4.1)$$

T_{rm} : 日移動平均外気温[°C], T_{rm-1} : 前日の日移動平均外気温[°C], T_{od-1} : 前日の日平均外気温[°C]である。本研究では $\alpha = 0.8$ とし、初日のみ T_{rm} と T_{od-1} は同値と仮定した。

室内外の気温の変動に応じて着衣量も変動していることが確認できる。分析データにおける日移動平均外気温から、最低値の1月(5.6°C)と最高値の8月(27.5°C)の間を上昇・下降する傾向であった。このことから本研究では、1月から8月までの外気温上昇期間を「上昇期」、8月から1月までの外気温下降期を「下降期」と定義する。ただし、この定義には一般的に夏あるいは冬と称される時期も含まれる。

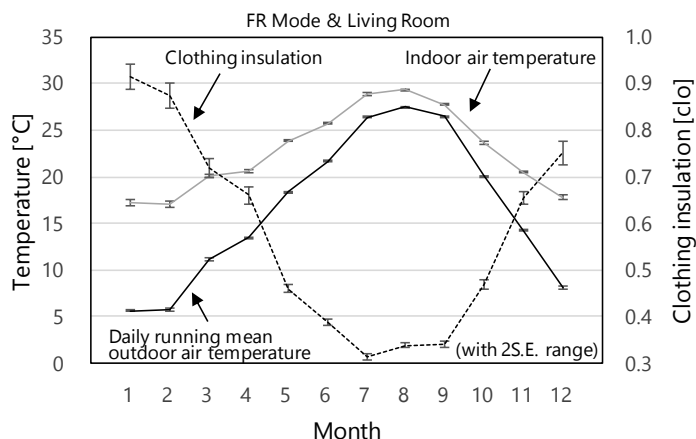


Figure 4.4 Variation of temperature and clothing insulation

4.5 FRモードにおける各月の寒暑感と室内気温の関係

居住者の熱的快適性は同気温帯でも上昇期と下降期では異なるという仮説の正誤を確認するため、各月の寒暑感(7段階)と室内気温の対応関係を図 4.5 に示す。はじめにエアコン不使用時である FR モードのみを対象としてみる。全体的にみると上昇期の方が下降期よりも暑い側に偏っていることが分かる。これは、人間の熱的快適性の判断基準は前の時期の温熱環境も影響を受けているためと考えられる。一方、この上昇期と下降期の違いは、「環境調整行動による適応」の可能性も考えられる。そこで、FR モード時の代表的な行動である着衣量調整について分析を行なった。

着衣量調整と履歴の関係の有無を検討するため、図 4.6 に各月の着衣量と日移動平均外気温の関係を示す。12月において着衣量が比較的少なくなっているものの、全体的には上昇期の方が下降期よりも着衣量が少なくなっている。ただし4月と11月は同等の外気温帯で同等の着衣量となっている。したがって、どの月でも必ず、上昇期の方が着衣量が少なくなるとは限らないと言える。

上昇期の方が寒暑感が暑い側に偏るのは、着衣調整に起因するのか、それとも人間側の

判断への履歴の影響なのかを検討するため、図 4.5 と図 4.6 の両方を比較して、それぞれの対応関係を分析する。6 月と 9 月は同等の寒暑感だが、下降期の方が室内気温は高く、着衣量は少ない。これは、室内気温に応じた着衣調整を行ったため、同等の寒暑感となったと考えられる。5 月と 10 月は室内気温と着衣量のどちらも同等だが、寒暑感では下降期の 10 月の方が少ない。これは、4 月と 11 月でも同様の傾向である。つまり、同等の室内気温・着衣量であるが上昇期の 4~5 月の方が暑い側に、下降期の 10~11 月の方が寒い側に申告が偏っているといえる。

以上の結果から、同等の気温環境でも気温の遷移による履歴の影響によって、冬から次第に気温が上昇してくる「上昇期」には暑く、夏から次第に気温が低下してくる「下降期」では寒く感じやすくなっていることを示唆していると考えられた。

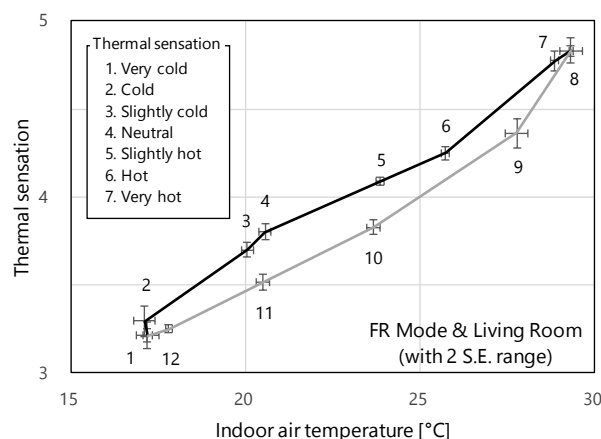


Figure 4.5 Relationship between thermal sensation and indoor air temperature

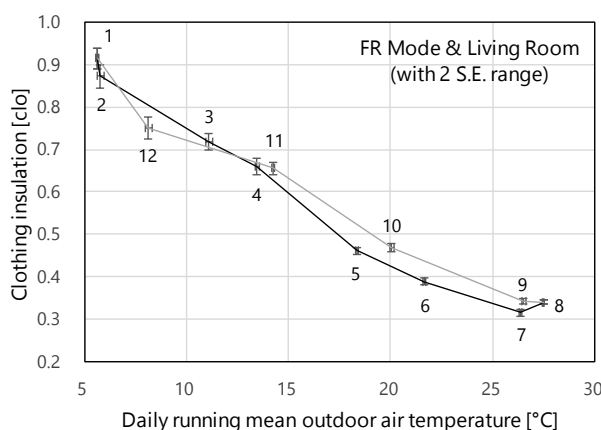


Figure 4.6 Relationship between clothing insulation and daily running mean outdoor air temperature

4.6 各月の快適温度と日移動平均外気温の関係

以上の結果から、気温変動の上昇・下降性の違いによって、春季と秋季では寒暑涼暖の

感じ方が異なると考えられる。これは、図 4.1 に示した履歴性のある適応モデルになる可能性を示唆している。そこで、適応モデルと同様の対応関係となる快適温度と日移動平均外気温の関係を各月でまとめて分析を行うこととする。なお、快適温度とは居住者自身が快適と感じるであろう温度の推定値であり、本研究では以下に示す寒暑感尺度と室内温度を代入する Griffiths 法[48][58][59][64][65][86][87]を用いて算出を行う。Griffiths 法の式は以下である。

$$T_c = T_i - (4 - TSV) / a \quad (4.2)$$

ここで、 T_c : 快適温度[°C]、 TSV : 寒暑感申告、 a : 回帰係数である。なお、 a は先行研究[86]を基に 0.5 とする。これは、寒暑感尺度の 1 尺度間あたりに 2°C の快適温度の補正を行うことを意味する。

算出された快適温度を用いて、FR モードにおけるリビングの快適温度と移動日平均外気温の関係性を図 4.7 に示す。各月を結んだ線から、外気温と快適温度の間には正の相関があることが分かる。一方、図 4.5 と図 4.6 よりも上昇期と下降期の差は小さい。これらのことをまとめると、快適温度の変動は室内環境だけでなく季節変動との対応関係もあるが、春季と秋季の差までは小さかった。図 4.6 の着衣量とも関連させて考えると、本研究の調査対象の居住者では春季・秋季における履歴の差異は適応モデルに導入する必要性はないが、着衣量モデルには導入するとよいと考えられた。これは、春秋の履歴の違いを含めた着衣調整を行っていたため、快適温度には履歴の差異は現れなかったことが考えられる。

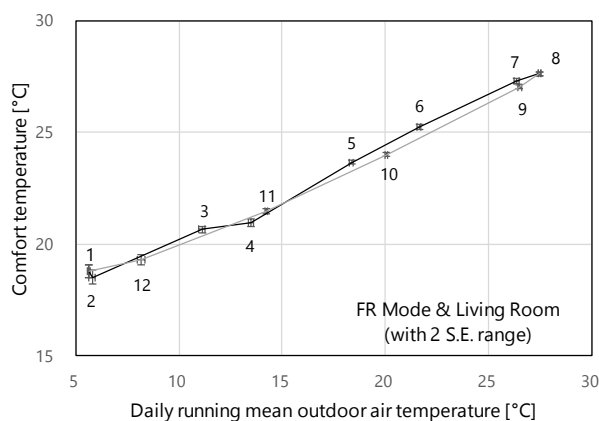


Figure. 4.7 Relationship between comfort temperature and daily running mean outdoor air temperature

4.7 各月の環境調整行動割合と申告時の外気温平均の関係

次にエアコン冷暖房使用時も考慮して分析することで、年間全てのケースを対象して比較を行う。環境値と居住者の環境調整行動の関係性を解明するために、図 4.8 に各月の環境調整行動割合と申告時の平均外気温を示す。図を見ると、それぞれの環境調整行動割合は年間を通して変動しており、居住者自身が季節変動に応じて環境調整行動を変

更していることがわかる。しかし、それぞれの環境調整行動の選択傾向は異なっている。そこで、初めに各々の環境調整行動の傾向をそれぞれ見ていく。

窓開放割合は5月から上昇していき、6月には最高割合となる。一方で、6月から8月にかけて外気温は上昇するものの、窓開放割合は減少する傾向であり、8月には0.45となる。その後、9月からの外気温低下傾向に対して、窓開放割合も減少していく。日本の一般的な住宅において、エアコン冷房使用時には運転効率低下を理由に窓は閉鎖する傾向がある。したがって、6月よりも8月の方が窓開放割合が低い理由は、エアコン使用頻度の増加が関係していると考えられる。そのため、窓開放とエアコン冷房使用の関係性も確認する必要がある。

扇風機使用割合についても同様に、外気温上昇に対して使用割合も増加する傾向である。7月と9月では扇風機使用割合が同等であるが、申告時の平均外気温には優位なさがある。申告時刻の誤差なども考慮するとこれらの外気温の差は小さいことも考えられるが、外気温上昇期と下降期での差の一つと考えられる。また、5月と10月では同等の外気温傾向に対して扇風機使用割合も有意な差がなく、これらの月には外気温上昇期・下降期の差はないことが考えられる。

エアコン冷房使用については、外気温上昇期と下降期の差がよく現れているものの一つである。エアコン冷房使用割合は8月に最大割合に達する。そして、外気温下降期(8月から10月)の方が外気温上昇期(5月から8月)よりも、冷房使用割合が高かった。特に5月と10月については、同じ外気温帯であるにもかかわらず、外気温下降期である10月の方がエアコン冷房使用割合が高かった。

エアコン暖房使用について、2月の方が12月よりも外気温が低いが、暖房使用割合に統計的な有意な差はない。また、11月と4月においては、11月の方が外気温は優位に低いが暖房使用割合に有意な差はなかった。

次に、全体的な傾向を分析する。外気温が最低となる1月においてエアコン暖房使用割合は最高値になるのに対して、外気温が最高となる8月にはエアコン冷房使用や扇風機使用の割合が最大となった。それらの一方で、窓開放割合については6月において最大割合となり、これは最高外気温となる8月ではなかったことから、その他の環境調整行動とは異なる傾向であった。これについて、エアコン冷房使用では7月から9月の方が6月よりも割合が高く、窓開放とエアコン冷房使用の移り変わりの対応関係があると考えられた。なお、10月から5月にかけては窓開放とエアコン冷房使用のどちらの割合も低かったため、居住者はこれらの採涼行動を実施しなかったことがわかる。これらの関係性から同じ外気温帯であっても、外気温上昇期は窓開放による自然対流を用いた採涼行動を実施することが多いのに対して、外気温下降期ではエアコン冷房のような機械空調を実施することが多く、季節変動レベルでの外気温上昇・下降傾向によって居住者自身が実施する行動は異なっていたことが考えられた。

これらの違いについて、居住者自身が日々の中で生活する上で得られた季節レベルの

熱的履歴が関係していることが考えられた。居住者たちは、外気温上昇期では窓開放による自然換気をよく実施し、外気温下降期では窓を閉鎖してエアコン冷房を使用することで、採涼行動を行っていた。外気温下降期ではエアコン冷房使用割合の方が高い理由について、居住者自身が（室内外を問わず）気温が低下していることを気づいていないことが関係しているのではないかと予想した。また、8月にエアコン冷房をよく使用していたことで、9月頃にまで外気温が下降しても「窓開放が採涼行動として有効」な選択肢の一つであることに気づいていないことも考えられる。

これらのことから、外気温の上昇期と下降期に応じて環境調整行動も異なることがわかり、特に窓開放とエアコン冷房使用については季節変動に応じて選択傾向が異なることがわかった。

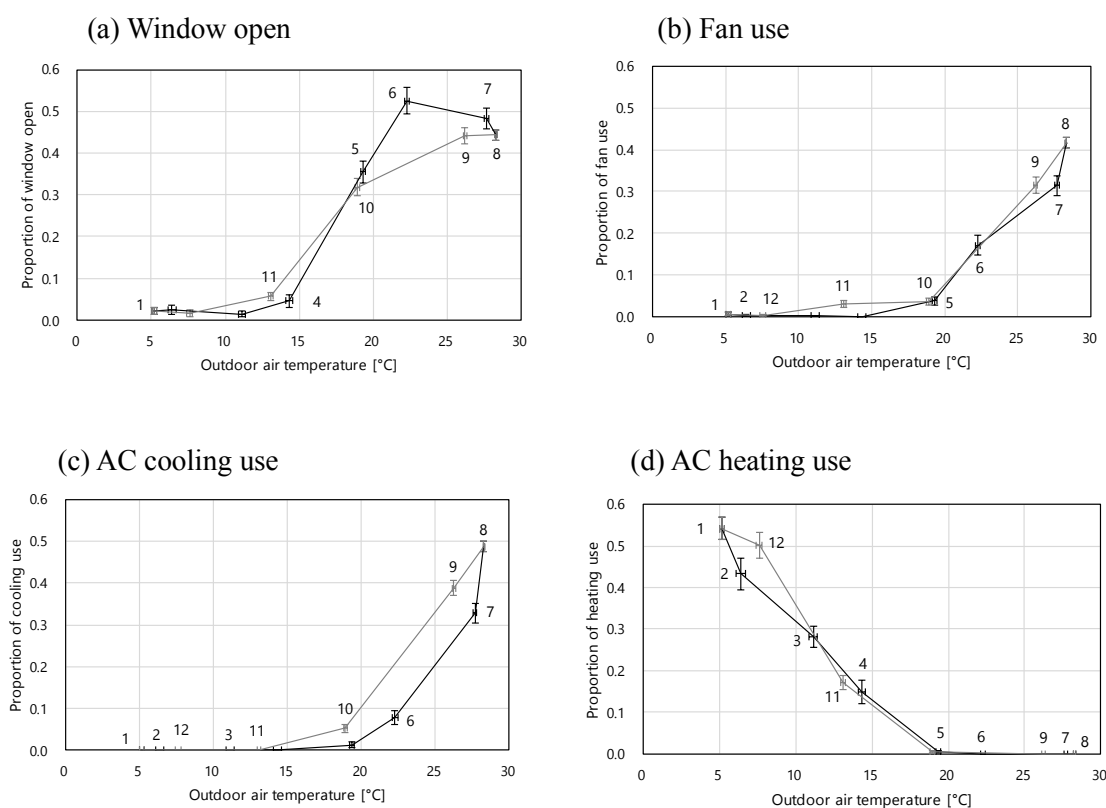


Figure 4.8 Relationship between proportion of occupant behaviours and outdoor air temperature

4.8. 各月の寒暑感と気温の関係

前節では環境調整行動の季節差に着目をした。本節では、熱的快適性についても季節差があるのかを解明する。

図 4.9 には各月の平均寒暑感と申告時の平均室内気温・平均外気温との関係を示す。月平均寒暑感の変動範囲は約 1.0 であり、これは実際の申告された数値よりも小さい。しかし、そのような小さい平均寒暑感の分布にも関わらず、各月の平均寒暑感の間には

有意な差がある。例えば、5月と10月では平均室内気温に有意な差がないが、平均寒暑感では春季である5月の方が高い。この傾向は11月と3月、4月においても同様に見られた。また、6月と9月では平均寒暑感に有意な差はないが、平均室内気温は約2°C異なる傾向であった。これらの傾向は外気温でも同様をみられる。これらの理由として考えられるのは、熱的快適性は直前の快適性履歴と比較してしていることである。前述の5月と10月の例でいえば、3~4月の低い温度の経験と比較して5月では暖かく感じ、一方で8~9月の高い温度を経験した10月では涼しく感じていることが考えられる。この温度変動と熱的快適性の関係性は、久野らが提案した温冷感モデル（二次元温冷感モデル）[88]の考え方も対応している。

以上の結果から、居住者たちは室内気温および外気温の上昇期と下降期の違いによって、熱的快適性の感じ方も異なっていることが明らかとなった。

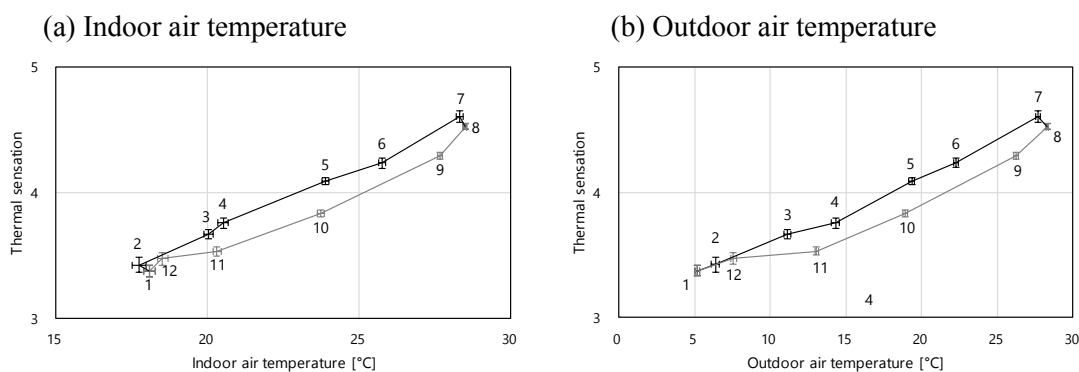


Figure 4.9 Relationship between monthly mean thermal sensation vote and air temperature

4.9 各月の快適温度と外気温の関係

適応モデルとは、快適温度と外気温の関係性を表したものである。これは、外気温変動に応じて快適と知覚する温度も変更されることを表しているが、これには外気温の上昇期と下降期の区別は行っていない。前述のように、環境調整行動や寒暑感が外気温の上昇期・下降期ごとに異なる傾向であるのならば、快適と知覚する温度も異なることが考えられる。これは、適応モデルにも反映すべきことではないだろうか。

そこで、適応モデルへの外気温の上昇期・下降期の差の反映の必要性を検討するために、図 4.10 に各月の平均快適温度と申告時の平均外気温の関係性を示す。図 10(a)をみると、外気温の上昇期と下降期で小さい差があることがわかる。その一方で、図 10(b)では快適温度と外気温の関係性の分布と数式を示しているが、どの外気温帯においても快適温度の分布が 5°C くらいまで広がっている。つまり、各月平均値を算出する前の快適温度の分布では、各月平均値よりも大きく広がっている傾向である。外気温上昇期と下降期の快適温度の差が、実際の快適温度の分布よりも狭いことから、適応モデルの算出時にはこれらの季節遷移期の差を考慮する必要がないことが考えられる。これは、適応モデル

の算出にはある程度のばらつきを示す範囲(バンド)も示すのが一般的であり、この季節遷移期の差は範囲内に収まると考えられるためである。

なぜ、適応モデルには外気温上昇期・下降期の差を考慮する必要がなかったのか。その理由として考えられることは、季節変動に応じて環境調整行動も変更していたためと考えられる。図4.9では寒暑感が外気温上昇期・下降期に応じて異なる傾向であることを示したが、それに応じて環境調整行動も変更した(図4.8)ため、快適に感じる温度自体に大きな差は現れなかったため、と予想される。

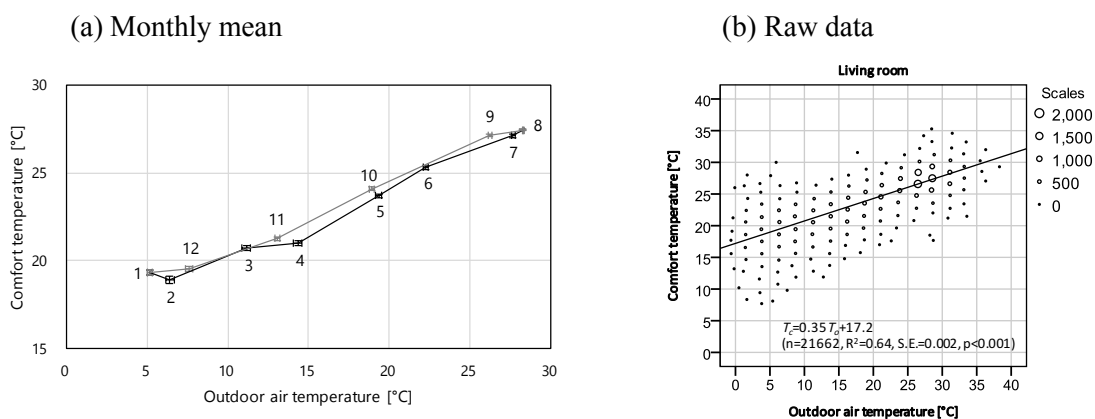


Figure 4.10 Relationship between comfort temperature and outdoor air temperature

4.10 外気温変動の指向性に基づいた環境調整行動モデルの算出

これまでの分析結果から、いくつかの環境調整行動では外気温の上昇期・下降期に応じて使用頻度が異なることが示唆された。特に、エアコン冷房使用については「5月から7月」と「9月から10月」において、同じ外気温帯であっても使用割合が異なることが分かった。そこで、エアコン冷房使用モデルを外気温上昇期・下降期ごとの算出を行い、エアコン冷房使用の季節差を比較する。図2.7が示すように、月ごとの外気温は1月から8月に向けて上昇をし、8月から1月に向けて下降する傾向である。そこで、本研究では分析データを「1月から8月」と「8月から1月」に分割してエアコン冷房使用モデルの算出を行うことにした(図4.11(a))。このモデル算出から得られたエアコン冷房使用モデルを図4.11(b)に示す。なお、図4.11(b)には各月のエアコン冷房使用割合と申告時の平均外気温も同時に示す。得られた回帰式を次に示す。

1月から8月 (外気温上昇期)

$$\text{logit}(P_{CL})=0.243 T_o-7.0 \quad (4.3)$$

(n=14163, R²=0.26, S.D.=0.006)

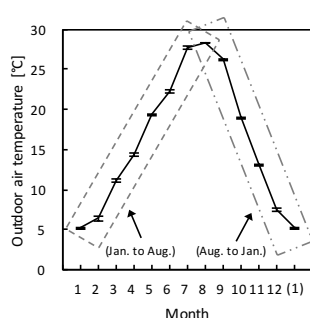
8月から1月 (外気温下降期)

$$\text{logit}(P_{CL})=0.257 T_o-7.6 \quad (4.4)$$

(n=14849, R²=0.27, S.D.=0.006)

図 4.11(b)をみると、外気温下降期の方が上昇期よりもエアコン冷房使用割合が高い傾向が、回帰分析の結果でも反映されている。例えば、外気温が 27.1°C の時のエアコン冷房使用割合は、外気温下降期で 0.398 であり、これは上昇期よりも 0.05 高い割合である。これは、同じ外気温であっても外気温下降期（秋季）の方がエアコン冷房を使用するケースが 5%多いことを意味する。つまり、春季よりも秋季の方がエアコン使用する居住者が少し多い傾向であることを意味する。これらのような環境調整行動モデルの開発において、図 4.11(b)の示すように外気温変動の変動方向の違いで回帰分析することは、季節レベルでの熱的履歴を考慮する上で重要な要素の一つと考えられる。今後、どのようにして環境調整行動モデルに季節変動の差を反映させるべきか、さらに議論が必要と考える。

(a) Definition of group and legend



(b) AC cooling use model

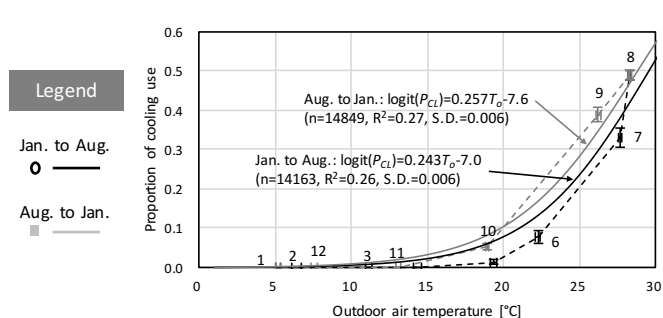


Figure 4.11 (a) Definition of two groups for increasing and decreasing outdoor air temperature, and (b) AC cooling use stochastic models for increasing and decreasing outdoor air temperature.

4.11 まとめ

第4章では、同じ外気温帯を持つ春季と秋季では「冬季から気温上昇してきた春季」と「夏季から気温低下してきた秋季」では熱的快適性が異なることで、環境調整行動も異なる可能性を基に、季節遷移期における気温変動方向の差異を環境調整行動モデルにはネイする必要性を検討した。本節では、以下の結論が得られた。

- 1) 各季節ごとに環境調整行動モデルを算出したところ、同じ外気温帯であってもエアコン暖房使用は春季の方が、エアコン冷房使用は秋季の方が多いことが明らかとなった。
- 2) 各月で行動割合を算出した結果、エアコン不使用時の着衣量や窓開放割合、エアコン冷房使用について、同じ外気温帯でも異なる傾向であった。これらの環境調整行動については、モデル化を行う時に春季と周期を分別してモデル化することで、より居住実態に近い行動モデルが得られると考えられる。
- 3) 申告調査で得られた寒暑感申告も用いて各月の平均値を確認したところ、同様に春季と秋季では同じ外気温帯であっても春季の方が暑い側に分布していた。一方で、FR モードの快適温度と外気温の関係性である適応モデルにおいては、春季と

秋季で差がないと考えられた。この理由として、春季と秋季で熱的快適性は異なるが、それに応じて環境調整行動も変更していたことで、快適と感じる温度の差はないに等しいことが考えられた。

- 4) 外気温上昇期と下降期ごとにデータを分割することで、気温変動に応じた冷房使用モデルを、ロジスティック関数を用いて算出した。得られた回帰式から、外気温下降期の方が上昇期よりも約 0.05 割合が高い傾向が得られた。

第5章 熱的快適性を考慮した 環境調整行動モデルの算出

5.1 本章の概要

本章では、環境調整行動の申告と同時に得られた熱的主観申告も用いて、使用時の熱的主観も反映した環境調整行動モデルを開発する。

5.2 では、熱的主観申告を考慮した環境調整行動モデルの概念とその計算手法について説明する。

5.3 では、寒暑感(TSV)と適温感(TP)を用いて、エアコン冷暖房使用行動の環境調整行動モデルを算出する。

5.4 では、前節で得られた環境調整行動モデルを用いて、傾向を把握する。

5.5 では、本章のまとめを記する。

5.2 熱的快適性を対応付けた環境調整行動モデルの開発の意義

環境調整行動とは、居住者自身の快適性を維持するための行動習慣であるが、環境調整行動の発現には「不快な環境を不快でないようにする為に行う」場合や、「(その瞬間は)不快ではないが、今後の不快な環境の発生を見込んで、調整行動をあらかじめ選択する」場合などが考えられる。つまり、調整行動を発現しないと不快になることから調整行動を行う、ということについて考えていることになる。

その一方で、過度な環境調整行動も不快を生み出すことが考えられる。ここでいう過度な環境調整行動とは、夏期に寒く感じるほどの冷房使用や、冬期に暑く感じるほどの暖房使用などが挙げられる。これらの事例は、複数の個人が同室するオフィスにおいて、体質の個人差などによって発生することが考えられるが、個人の在室においても、必ずしも発生しないとは考えられない。そもそも、人間は常に熱的快適性に関することのみを思考・意識しているわけではなく、過度な使用による熱的不快の発生を見逃すことも十分考えられる。また、睡眠時には空調機器の設定を変更できないことから、就寝前に上手に設定しておかないと、起床時に過度な使用による室内環境が形成されていることも十分に考えられる。先行研究をみると、これらのような過度な環境調整行動に関する研究は筆者らの知る限りでは見当たらない。熱的快適性を対応付けた環境調整行動モデルを開発すると、適切な環境調整行動の運用な省エネルギー可能性に関する知見として活用できる可能性があるため、このようなモデルを開発することは意義があると考えられる。例えば、住宅における冷房空調のエネルギー使用のシミュレーションのための一知見として、貢献できると考えられる。冷房の使用割合の内、過度な使用割合に相当する割合を算出することにより、どれくらいの割合の削減する余地があり、使用電力などの数値に変換することで、削減できる使用電力値を推定することができると思われる。

そこで、第5章では申告調査で得られた熱的主観申告や冷房使用/不使用のデータを用いて、過度な環境調整行動がどれくらい行われているのかを明らかにする。本研究では、省エネルギー課題として特に注目がされているエアコン使用について、熱的快適性を対応付けたモデルの開発を行う。

5.3 過度なエアコン冷房使用モデルの算出

(a) 冷房使用時の寒暑感の分布

はじめに、エアコン冷房使用時の熱的快適性を確認する。図 5.1 に CL モード時の寒暑感の分布を示す。「4. どちらでもない」が最も多く、平均寒暑感 4.2 からその傾向を確認できる。一方で、 $TSV \leq 3$ の寒い側の申告も全有効回答数の 8.0% である 550 申告が存在する。これは、およそ 13 回に 1 回は寒い側と感じていると考えられる。したがって、寒く感じる前に冷房使用を停止することができれば、約 8.0% の機会エネルギー使用の削減効果の余地があったことが示唆されている。

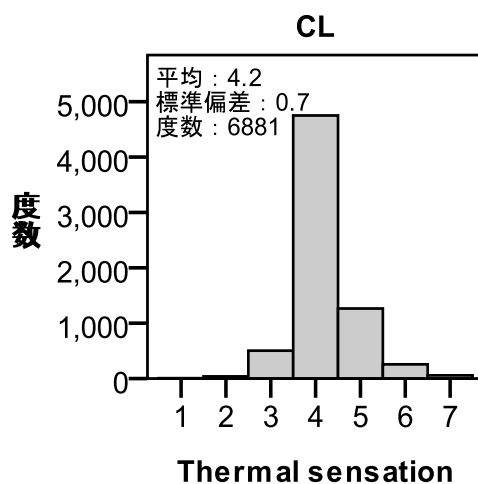


図 5.1 CL モード時の寒暑感の分布

(b) CL モード時の $TSV \leq 3$ 申告割合と外気温の関係

次に、冷房使用時に寒い側の申告の割合がどのように変動するのかを、エアコン冷房使用モデルの式(3.6)と関連付けて表現するために、外気温を独立変数とした時の CL モード時の $TSV \leq 3$ 申告発現割合との関係を回帰線で示すことを試みた。

まず、図 5.2 のプロットで示した各外気温の寒い側申告の割合を確認すると、全体的に 0.05~0.15 の範囲の中で、外気温が上昇すると寒い側の申告が減少していく傾向があることが確認できる。このことから、本研究においては CL モードにおける寒い側の申告割合と外気温の関係は、二次関数などを用いる必要がなく、一次関数を用いたロジスティック回帰分析などを用いて示すのが適切である。求めた回帰式を以下に示す。

$$\text{logit}(P_{Vc}) = -0.077 T_o - 0.333 \tag{5.1}$$

($n=6,798$, $R^2=0.003$, $S.D.=0.016$, $p<0.001$)

P_{Vc} : CL モード時における寒い側申告の割合である。

図 5.2 の回帰線は、この式(5.1)を図示したものである。得られた回帰式から、例えば外気温が 24°C の時に P_{Vc} が 0.10 となるが、これは外気温が 24°C の時に冷房使用をすると 10 回中 1 回は寒いと感じていたことを示す。また、外気温が 30°C であっても P_{Vc} は 0.066 となり、およそ 7% の機会寒いと感じた冷房使用となっている。

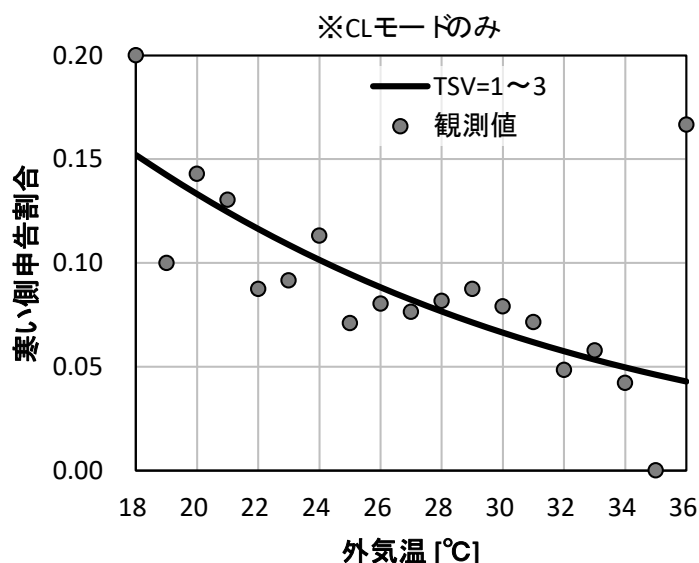


図 5.2 CL モード時の TSV ≤ 3 発生割合と外気温の関係

(c) 外気温に基づく、寒さを感じる時の冷房使用割合

本節では、図 3.3 で示した冷房使用割合と外気温の関係に、図 5.2 寒い側を申告している時の冷房使用の発現割合も加えて図示を行う。これについては以下の関係式を用いて算出する。

$$P_{VcMX} = P_{CL} \times (1 - P_{Ve}) \tag{5.2}$$

P_{VcMX} : MX モードにおける TSV ≤ 3 の時の冷房使用割合である。この関係式を用いて算出し、図示したものが図 5.3 である。実線が冷房使用割合を、点線が寒いと感じていない(TSV ≥ 4)時の冷房使用割合を示すと考えられ、実線と点線間のエリアが TSV ≤ 3 の時の冷房使用割合を示している。また、TSV ≤ 3 と TSV ≥ 4 の場合の MX モード時の回帰線が示す冷房使用割合を表 5.1 に外気温 1°C ごとに示す。

前節で示したように、CL モード時の TSV ≤ 3 申告の割合は外気温上昇に応じて減少する傾向にあった。しかし、冷房使用割合が増加するため、日常的な外気温の範囲内における全体的にみた寒く感じる時の冷房使用割合は、外気温の上昇に応じて増加傾向にあることが分かった。

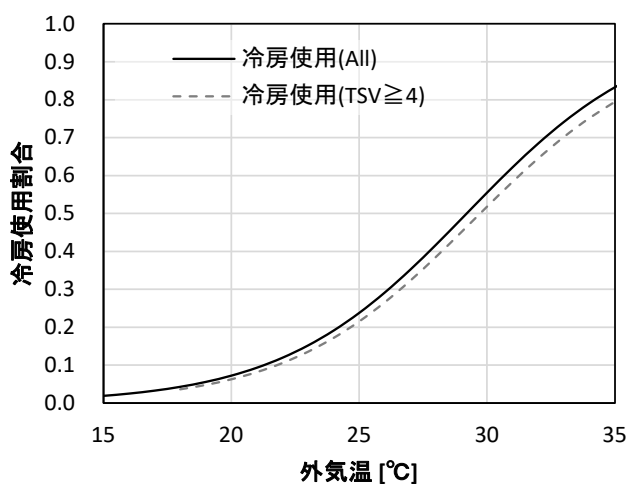


図 5.3 TSV に応じた冷房使用割合と外気温の関係

表 5.1 TSV に応じた各外気温の冷房使用割合

To [°C]	冷房使用割合		
	A II	TSV ≤ 3	TSV ≥ 4
18	0.043	0.007	0.036
19	0.056	0.008	0.048
20	0.072	0.010	0.063
21	0.093	0.012	0.082
22	0.120	0.014	0.106
23	0.152	0.017	0.135
24	0.191	0.019	0.172
25	0.238	0.023	0.215
26	0.292	0.026	0.266
27	0.352	0.029	0.323
28	0.417	0.032	0.385
29	0.486	0.035	0.451
30	0.555	0.037	0.518
31	0.622	0.038	0.583
32	0.684	0.039	0.645
33	0.741	0.040	0.701
34	0.791	0.039	0.751
35	0.833	0.038	0.794

(d) リビングと寝室の差異

同様の分析をリビングと寝室毎に分析データを分けて分析し、得られた式を表 5.2 に示す。それらの式を用いて、回帰線に図示したものを図 5.4 に示す。

TSV ≤ 3 の冷房使用割合をみると、寝室の方がわずかに大きい傾向があることが考えられる。寝室については、就寝前後に調査を行っているため、冷房使用の意識的な操作を長時間行うことが難しい起床後のデータが含まれている寝室では、寒い時の冷房使用の発生が起きやすいことが関係していると考えられる。

表 5.2 リビングや寝室における回帰式

場所	回帰式	n	R ²	p	S.D.
リビング	$bg \#(P_{CL})=0.294 T_o-8.533$	21865	0.264	<0.001	0.005
	$bg \#(P_{VC})=-0.072 T_o-0.522$	4806	0.003	<0.001	0.019
寝室	$bg \#(P_{CL})=0.294 T_o-8.533$	12821	0.229	<0.001	0.008
	$bg \#(P_{VC})=-0.072 T_o-0.346$	1992	0.003	0.029	0.012

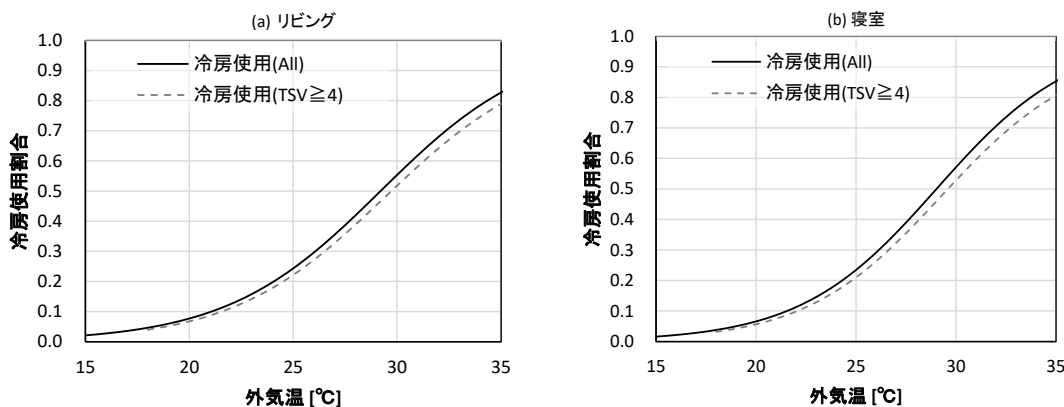


図 5.4 各部屋の TSV に応じた冷房使用割合と外気温の関係

5.4 過度なエアコン暖房使用モデルの算出

5.4.1 暖房使用時の寒暑感の分布

次にエアコン暖房使用モデルについても熱的快適性を対応づけて、過度なエアコン暖房使用割合の算出を試みる。図 5.5(a)に HT モード時の寒暑感の分布を示す。「4. どちらでもない」が最も多く、HT モードの 62.8%(2005 申告)を占める。一方で、TSV ≥ 5 の暑い側の申告は 2.7%(88 申告)であり、「7.非常に暑い」は申告されなかった。節 3.2(d)で示した過度な冷房使用である 8.0%と比較すると、2.7%は約 1/3 であり、暖房使用では更に少ないことが分かった。これらのことから、過度な暖房使用機会を減らすことによって得られるエネルギー使用の削減効果は、現時点ではあまり期待できないと考えられた。ただし、暖房は冷房と比べてエネルギー使用量は一般にかなり大きく、世帯当たりの年間のエネルギー消費量は暖房の方が高い[16]ことから、使用・不使用の頻度のみで比較できないことも注意する必要がある。

次に、図 5.5(b)に寒暑感と外気温の関係を示す。過度な暖房使用は、暖房使用不使用の判断が難しい春や秋といった過渡期に行われると考えたため、約 15~20°Cの外気温帯でのみ行われると予想した。しかし、図 5.5(b)をみると、約 0~18°Cの範囲の幅広い外気温帯で暑い側の申告がなされていることが分かった。このことから、過度な暖房使用は春秋に限らず、冬においても行われていることが分かる。

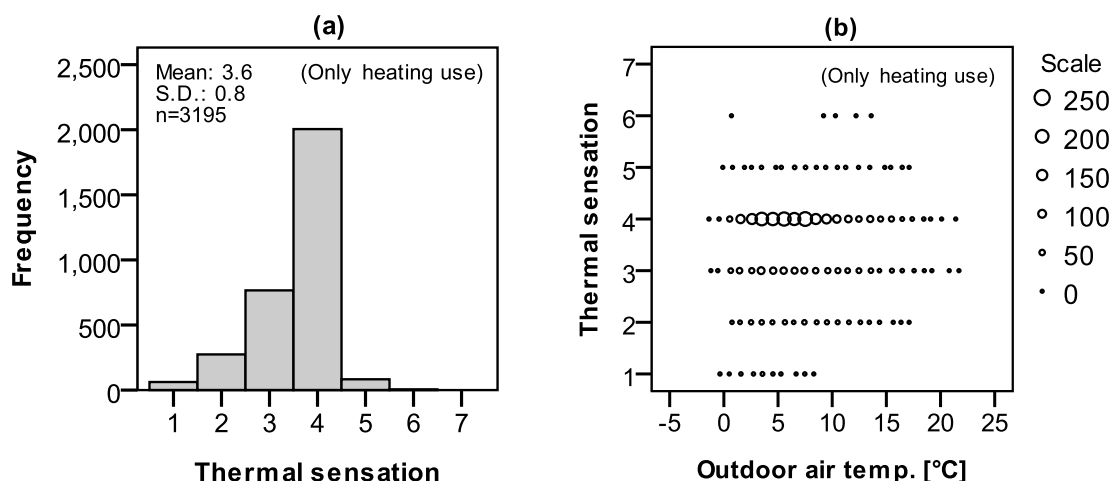


図 5.5 申告された寒暑感, (a)寒暑感の分布, (b)外気温との関係

5.4.2 過度な暖房使用と外気温の関係の算出

次に本節では、過度な暖房使用の割合を示す環境調整行動のモデルの算出を試みる。ここでも過度なエアコン冷房使用モデルと同じ算出手法を用いて、エアコン冷暖房でどちらの方が過度な使用が多いか、比較する。

(a) 暖房使用時の TSV ≥ 5 申告割合と外気温の関係

暖房使用時の暑い側申告の変動を明らかにする為に、図 5.6 に 1°C ごとの暑い側申告割合をプロットで示し、得られた回帰式に基づく曲線を示す。

プロットを確認すると、0~14°C の暑い側申告は約 0.05 未満の範囲で緩やかな上昇傾向にあり、15~17°C で傾きが大きくなる傾向がある。これらのことから、一次関数ではなく傾きが変化する回帰線の方が適切と考えられた。

そこで本研究ではロジスティック回帰式とガウス関数を用いて算出を試みた。以下に式を示す。

Logistic regression

$$\text{logit}(P_{Vh}) = 0.093 T_o - 4.285 \quad (5.3)$$

(n=3187, R²=0.004, S.E.=0.024, p<0.001)

Gaussian function

$$P_{Vh} = 8530.32e^Y \quad (5.4)$$

$$Y = -(T_o - 319.997)^2 / 7719.3947 \quad (5.5)$$

(n=3187, R²=0.004)

P_{Vh} : 暖房使用時における暑い側申告の割合である。なお、外気温の範囲は共に $0 \leq T_o \leq 17$ であった。

本分析では、15~17°C における割合の上昇にできるだけフィットさせるために、一次関数以外の関数を選択したが、実際に回帰分析を行うと、割合がそこまで上昇していない。これは、回帰分析の算出には図に示したプロットではなく、使用/不使用を示す 01 のバイナリ

データを用いて分析を行っており、端のデータになるほどデータ数が少なくなる傾向により、データ数の少ない外気温帯に対する重みが小さくなるためである。

そこで、本研究では、高外気温帯の暑い側申告割合がプロットと同様にわずかに高く、回帰式の係数もシンプルであるロジスティック回帰式の方を、本研究における分析結果として採用した。

求められた回帰線は約 0.02~0.06 の範囲をゆっくり上昇する傾向であった。既報 5)で示した、冷房使用中の寒い側申告割合では、外気温減少に応じて高くなっており、本研究の過度な暖房使用割合とは反対の傾向を示している。これらをまとめると、冷暖房のどちらのケースにおいても、春秋といった過渡期の外気温に近づくと割合が増加する傾向があることが分かった。

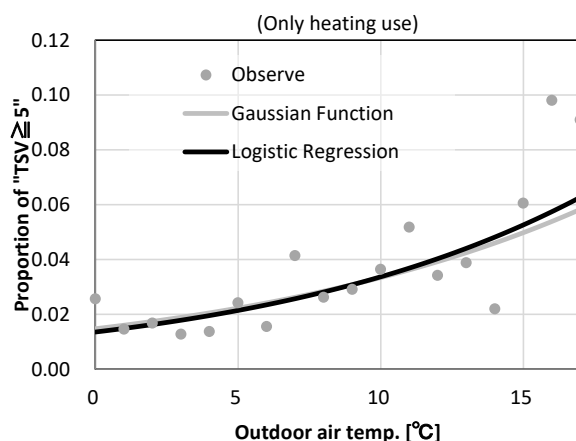


図 5.6 暖房使用時の TSV ≥ 5 発生割合と外気温の関係

(b) 外気温に基づく暑さを感じる時の暖房使用割合

本節では、式(3.7)と式(5.3)を用いて、暖房使用割合と外気温の関係に暑い側を申告している時の暖房使用の発現割合も加えて図示を行う。過度な暖房使用の割合は、以下の関係式を用いて算出する。

$$P_{VhMX} = P_{HT} \times P_{Vh} \tag{5.6}$$

P_{VhMX} : 過度な暖房使用の割合である。この関係式を用いて算出し、図示したものが図 5.7 である。実線が暖房使用割合を、点線が暑いと感じていない($TSV \leq 4$)時の暖房使用割合 ($1 - P_{VhMX}$)を示すと考えられ、実線と点線の間が $TSV \geq 5$ の時の暖房使用割合 P_{VhMX} を示している。また、表 5.3 に求めた回帰式の暖房使用割合を外気温 1°C ごとに示す。

回帰線からも明らかなように、どちらの回帰線もほぼ同じ傾向を示しており、ほぼ重なっているように見える。表 5.3 で具体的な値を見ると、暑い側申告($TSV \geq 5$)では最大でも 0.009 であり、外気温が上昇するにつれて減少するため、どの外気温帯でも過度な暖房使用が非常に小さいことがわかる。前節で示した過度な冷房使用割合では、最大で 0.040 まで上昇しており、過度な暖房使用の約 4 倍の機会があることがわかった。これらのことから、

過度な暖房使用によるエネルギー使用の削減余地はほぼないことが示唆された。

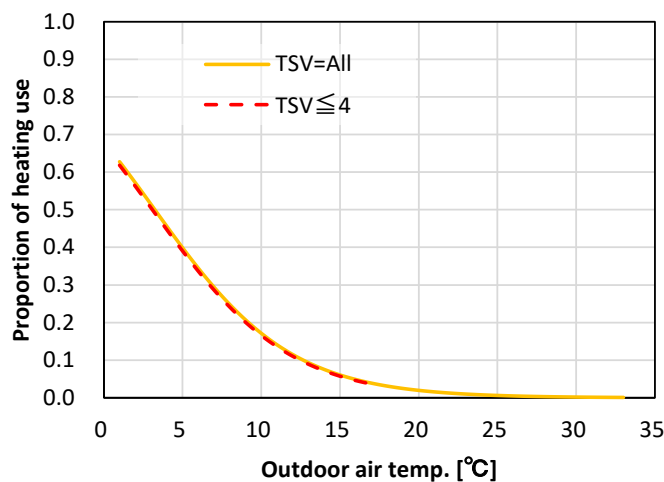


図 5.7 TSV に応じた暖房使用割合と外気温の関係

表 5.3 TSV に応じた各外気温の暖房使用割合

T_o	Heating use		
	All	$TSV \geq 5$	$TSV \leq 4$
1	0.628	0.009	0.618
2	0.572	0.009	0.562
3	0.514	0.009	0.505
4	0.456	0.009	0.447
5	0.399	0.009	0.390
6	0.345	0.008	0.336
7	0.294	0.008	0.286
8	0.248	0.007	0.241
9	0.207	0.006	0.201
10	0.172	0.006	0.166
11	0.141	0.005	0.136
12	0.115	0.005	0.110
13	0.093	0.004	0.089
14	0.075	0.004	0.072
15	0.061	0.003	0.057
16	0.049	0.003	0.046
17	0.039	0.002	0.036

(c) リビングと寝室の比較

前節の結果では、過度な暖房使用がほぼない傾向が明らかとなったが、リビングや寝室のように単独で分析を行う場合に、どちらか一方では過度な暖房使用が多くあるかもしれないと考えられたことから、分析対象をリビングと寝室に分割して回帰式を算出した。求めた回帰式を表 5.4 と図 5.8 に示す。ただし、寝室の P_{vh} 算出時において、該当データの 878 申告中、3 申告しか暑い側の申告がなく、回帰式は有意ではなかったため、省略する。この理由として、本調査のデータは布団の外のデータであり、布団や着衣の調整によって寝床内の温熱環境を確保できるため、寝床外の寝室内の温熱環境はあまり考慮していない

のではないかと考えられる。暖房使用割合は、リビングの方が寝室よりも多い傾向がある。そのため、過度な暖房使用割合も最大値が 1.4%と、表 5.3 で示す全体のケースよりもわずかに多い傾向であった。

以上を踏まえて、僅かに発生している過度な暖房使用は、主にリビングで行われていることが分かった。

表 5.4 求められた各部屋の回帰式

場所	回帰式	n	R ²	S.E.	p
リビング	$\log it(P_{HT}) = -0.268 T_o + 1.570$	17849	0.266	0.005	<0.001
	$\log it(P_{Vh}) = 0.088 T_o - 3.965$	2309	0.005	0.026	0.001
寝室	$\log it(P_{HT}) = -0.220 T_o - 0.095$	12719	0.130	0.007	<0.001

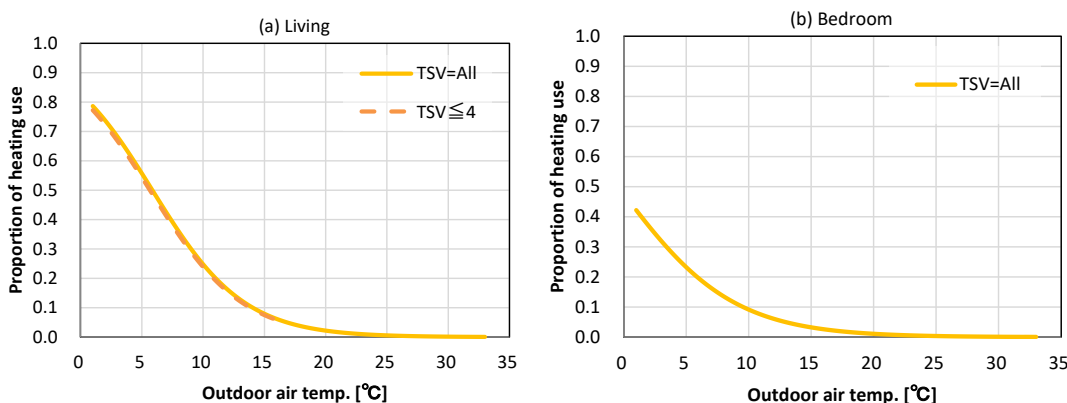


図 5.8 各部屋の TSV に応じた暖房使用割合と外気温の関係

5.5 まとめ

第 5 章では、「熱的快適性を対応づけた環境調整行動モデルの発展可能性」を念頭に、過度なエアコン冷暖房使用モデルの開発を行なった。本節では、以下の結論が得られた。

- 1) 環境調整行動申告と同時に回答された寒暑感申告を用いて、「冷房使用時に寒く感じている」ケースを過度な冷房使用、「暖房使用時に暑く感じている」ケースを過度な暖房使用と定義し、外気温を説明変数とした行動モデルを開発した。
- 2) 冷房使用時に寒く感じる申告は外気温が低い方が多くなるが、冷房使用頻度は外気温が高くなるほど多くなることから、過度な冷房使用割合は外気温が上昇するにつれて増える傾向であった。暖房使用についても同様に暑く感じる割合は外気温が高い方が多くなるが、過度な暖房使用割合は外気温が低下するにつれて増加する傾向を示した。
- 3) また、リビングと寝室のデータ分割を行うことで、過度なエアコン使用モデルの算出も行なった。
- 4) 過度なエアコン使用割合を確認すると、過度なエアコン冷房使用割合は 38°C 以上で

3%以上に達する一方で、過度なエアコン暖房使用割合はどの外気温帯であっても 1%未滿であり、過度な冷房使用の頻度よりも少ないことが明らかとなった。

第 6 章 環境調整行動モデルを用いた 居住者行動の再現の試行

6.1 はじめに

本章では、これまでの章で得られた分析結果を用いて、建築熱負荷シミュレーションの人間行動設定への導入方法を検討する、シミュレーションへの導入可能性を検証する。

6.2 では、ESP-r における環境調整行動モデルの導入手法を確認する。

6.3 では、窓開閉・エアコン冷暖房統合モデルを用いて、各行動割合の大小関係から行動切り替えとなる外気温の閾値をまとめる。

6.4 でも、窓開閉・エアコン冷暖房統合モデルを用いて、各行動の最大割合を基準にした外気温の閾値をまとめる。

6.5 では、節 6.3 で得られた外気温閾値を実際の外気温時系列データへ適用し、居住者行動がどのように切り替わるのかをシミュレーションする。また、シミュレーション結果と実際のフィールド調査データの傾向を比較して、シミュレーション精度を検証する。

6.6 では、本章のまとめを記す。

6.2 ESP-r 導入のための手法の検討

前節までに開発された環境調整行動モデルを、建築熱負荷シミュレーションへどのように導入するかを検討する。なお、本研究での利用を想定するソフトウェアは、先行研究[36][40]において窓開閉モデルを導入された実績のある ESP-r とした。

ESP-r では、窓開放だけでなくエアコンや照明の On/Off などの建築環境設備の制御を 2 種類の設定方法がある[71]。

①各時間帯で建築環境設備の状態を各々で設定できる（スケジュールと呼ばれる）

②閾値となる温度値と現在の温度を比較して、各々の環境調整設備の状態を変更する
なお、①について、ESP-r では平日や週末、祝日ごとにスケジュール設定を作成することができる。

本研究で開発された環境調整行動モデルでは、各々の行動状態に対して外気温変動を対応付けている。そのため、手法②のように外温度の閾値を設定して、環境調整行動の制御を行う手法で、モデル導入が可能と思われる。

そこで、得られた環境調整行動モデルを用いて、各々の環境調整行動の制御のための外気温の閾値を決定して、ESP-r の居住者行動設定への導入可能性を検討する。

6.3 環境調整行動割合の大小関係を用いた窓開閉とエアコン冷房の制御に関する外気温閾値の設定

次に、開発された環境調整行動モデルを用いて、環境調整行動の制御のための外気温閾値の算出を行う。本研究では建築熱負荷シミュレーションの算出項目の一つである室内気温への影響が大きいと考えられる、窓開閉とエアコン使用に注目して検討を行う。そのため、外気温閾値の検討には窓開閉・エアコン冷暖房使用の統合モデル（図 3.11）を使用する。

窓開閉・エアコン冷暖房使用の統合モデルは、一つのモデル中において窓開閉とエアコン使用の頻度を相対的割合で算出できるモデルであるため、それぞれの外気温における環境調整行動の頻度を順位付けすることができる。これらの環境調整行動割合の大小関係を用いることで、各々外気温での環境調整行動の優先傾向を把握できると考えられる。

そこで、外気温値ごと環境調整行動割合を比較して、環境調整行動が切り替わる外気温閾値の算出を試みる。図 6.1 に、窓開閉・エアコン冷暖房使用の統合モデル中に算出された外気温閾値をまとめた。窓開放とエアコン冷房使用については表 3.5 で示した通り外気温が 28.9°C の時に同割合となり、28.9°C よりも低くなると窓開放の方が多く、反対に高くなるとエアコン冷房使用の方が多くなることが明らかとなっている。この値を利用すると、28.9°C 以上ではエアコン冷房使用が行われるように外気温閾値を設定できると考えられる。

次に窓開閉の制御設定を検討する。窓開放割合 P_W とエアコン不使用时の窓閉鎖割合 P_{WCFR} を比較すると、外気温が 20.8°C で同割合となり、20.8°C よりも高くなると窓開放割合の方が高いことが明らかとなった。このことから、窓開放とエアコン冷房使用と同様に、20.8°C を外気温閾値として窓開閉を制御する設定が考えられる。

次に、暖房使用の設定を検討する。しかし、暖房使用割合とエアコン不使用时の窓閉鎖割合を比較したところ、暖房使用割合の方が高くなる外気温帯は見当たらなかった。これは、暖房使用モデルからもわかるように、暖房使用割合が 0.5 以上にならなかったことが要因と考えられる。このように、各々の環境調整行動割合が十分に上昇しない場合には、環境調整行動割合の大小関係を利用して環境調整行動の制御を設定できない可能性があることが明らかとなった。

以上の分析結果から、各環境調整行動の制御に対応する外気温範囲を表 6.1 にまとめた。外気温が 20.8°C 未満ではエアコンは使用されずに窓も閉鎖となるが、20.8~28.8°C では窓を開放し、28.9°C 以上では窓を閉鎖してエアコン冷房を使用する設定が得られた。

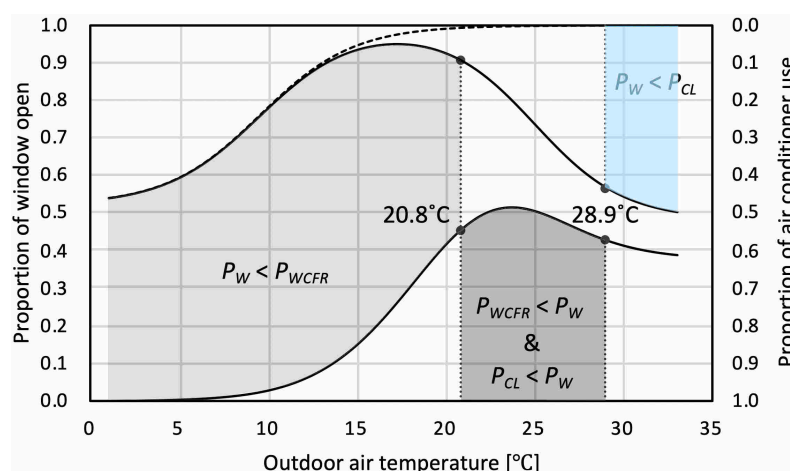


図 6.1 窓開閉・エアコン冷暖房の統合モデルと環境調整行動割合の大小関係から算出された外気温閾値および範囲

表 6.1 算出された外気温範囲とそれに対応する窓開閉・エアコン冷房使用

Range of T_o	Occupants' Behaviour
~20.8	Window closed (FR)
20.8~28.9	Window open
28.9~	CL use

6.4 最大環境調整行動割合を利用した窓開閉とエアコン冷暖房の制御に関する外気温閾値の設定

前節では、環境調整行動割合の大小関係から行動使用の基準となる外気温閾値の設定を検討したが、使用割合が十分に上昇しなかった暖房使用については外気温閾値が設定できなかった。これを解決するには、環境調整行動割合が十分に上昇しないケースでも使用設定できるような外気温閾値の算出手法が必要である。

各々の環境調整行動モデルをみると、それぞれの行動に対して最大割合を持っていることがわかる。そこで、最大環境調整行動割合に対する各外気温帯の行動割合の比率を用いて行動使用の設定を行うことも可能であると考えられた。そこで、最大環境調整行動割合に対する行動割合が50%となる外気温を算出して、50%以上となる外気温で行動実行とする制御のため外気温閾値の算出を行なった。外気温閾値の算出のために、外気温0.1Kごとに次の式で計算を行なった。

$$P_{\text{Percent}} = P / P_{\text{max}} \quad (6.1)$$

P_{Percent} ：最大環境調整行動割合に対する行動割合の比率、 P ：環境調整行動割合、 P_{max} ：最大環境調整行動割合である。

上記の算出過程から得られた各環境調整行動の外気温閾値を、図6.2にまとめた。エアコン暖房使用モデルでは外気温低下に応じて割合も上昇する傾向があることから、モデル上での最低外気温である1°Cの時の割合0.463が最大値となる。この最大割合に対して約50%の割合となるのは外気温9.7°Cの時の0.231であった。このことから、外気温9.7°C以下では暖房が使用されるような制御設定が考えられた。

次にエアコン冷房と窓開閉についても、エアコン暖房と同様に算出を行なった。エアコン使用モデルは、外気温が上昇するにつれて割合も上昇することから、モデル上での最高外気温である33°Cで最大割合0.500となった。この最大割合の約50%に相当する割合は、24.7°Cの時の0.248であった。窓開放モデルはエアコン使用と異なり、23.7°Cの時に最大開放割合0.516となる。この最大割合の約50%に相当する割合は17.1°Cの時の0.255であった。これらのことから、外気温が17.1°C以上では窓開放を実施し、24.7°C以上ではエアコン冷房を使用するような行動制御が考えられた。

以上の分析結果を基に、環境調整行動モデルの使用状況とそれに対応する外気温範囲を表6.2にまとめた。外気温が9.7°C以下ではエアコン暖房使用が実施され、9.8~17.0°Cではエアコンは使用されず窓も閉鎖となる。外気温が17.1°C以上では窓が開放され、24.7°C以

上ではエアコン冷房が使用される外気温範囲となった。

ただし、最大環境調整行動割合を用いて算出したこの手法では、各々の環境調整行動モデルごとに行動制御を設定しているため、各々の環境調整行動の優先傾向は把握できない。そのため、「何も行動していない状態（その割合は P_{WCFR} で表現）」からの行動生起については各々で算出できるが、窓開閉とエアコン冷房使用の関係性といった環境調整行動同士の切替については十分に表現ができない。これを克服する手段としては、エアコン冷房の外気温閾値である 24.7°C を基準に窓開放とエアコン冷房を切り替える方法も考えられる。しかし、図 6.1 でも示すように窓開放とエアコン冷房の使用割合の大小関係が逆転する外気温が 28.9°C であり、これは 24.7°C よりも 4.2K 低い外気温閾値である。このことから、この手法を用いる場合には、採涼行動である窓開放とエアコン冷房使用の選択切り替えについて、さらに検討を進める必要があることがわかった。

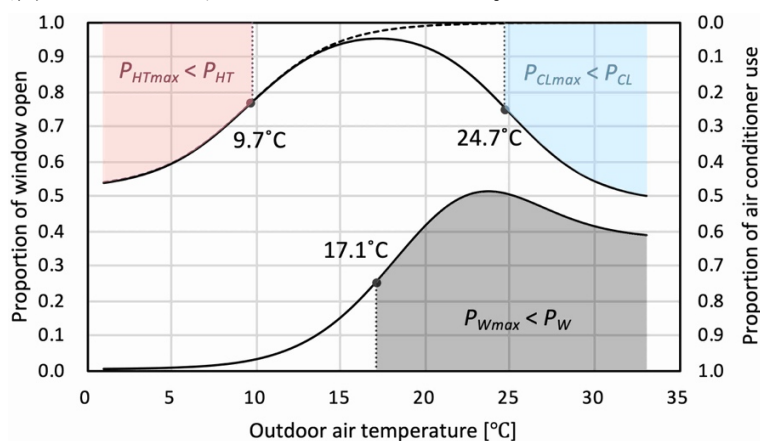


図 6.2 窓開閉・エアコン冷暖房の統合モデルと環境調整行動割合の上昇具合から算出された外気温閾値および範囲

表 6.2 算出された外気温範囲とそれに対応する窓開閉・エアコン冷暖房使用

行動制御方法 02	
Range of T_o	Occupants' Behaviour
~9.7	HT use
9.7~17.1	Window closed (FR)
17.1~	Window open
24.7~	CL use

6.5 外気温変動に対する窓開閉とエアコン冷房の制御結果

前節では各環境調整行動に対応する外気温の閾値を設定し、窓開閉やエアコン使用の制御設定を立てた。しかし、これらの制御設定を実際に用いると居住者行動はどのように制御されるのかは明らかでない。特に、夏季の採涼行動は窓開放とエアコン冷房の 2 つの選択肢があり、これらがどのように切り替わるのか解明することは、夏季の室内温熱環境と省エネルギー性に関わる重要な課題である。

そこで本節では、実際の外気温測定値の時系列データに前節で得られた環境調整行動の制御設定を実際に適用して、環境調整行動がどのように運用されるのかをシミュレーションした。実際に測定された外気温の時系列データは、気象庁のホームページから取得を行なった。なお、本研究で取得したデータは、フィールド調査日程とおおよそ重なる2013/6/1～2013/10/31の1時間毎の横浜の外気温とした。そのため、窓開閉とエアコン冷房使用・不使用の制御も1時間毎に算出を行なった。この外気温時系列変動と窓開放・エアコン冷房の制御結果を図6.3に示す。なお、図6.3では、黒折線が外気温を示し、緑点が窓開放、青点がエアコン冷房使用をしたタイミングを示している。

5月において、初旬では窓開放はあまり行われなかったが、下旬の5/21以降になると窓開放がよく行われた。次に6月をみると、6/18の間欠的な冷房使用を除いて、採涼行動として窓開放のみを選択する傾向であった。7月中旬では窓開放だけでなくエアコン冷房使用も実施されるようになり、外気温が比較的高い日中にはエアコン冷房使用を、比較的低い夜間には窓開放が実施されている傾向となった。この傾向は8月にもみられる。9月に入るとエアコン冷房の使用頻度は減少し、9月下旬では窓開閉の制御が中心になっている。10月も窓開閉が中心の制御となり、10/4と10/5のように外気温が特に低くなることで窓開放が実施されない日も現れた。10月下旬になると窓開放も行われないう傾向となった。

特に8月について注目すると、外気温が最も高い傾向となる8/10～8/12では、夜間の一部の時間帯のみ窓開放を行い、それ以外は冷房を使用し続ける制御となっている。ここで、図6.4に2013/8/11における1時間ごとの外気温測定値と得られた窓開閉・エアコン冷房使用の制御結果を示す。夜間は日中よりも外気温が低くなるため、エアコン使用から窓開放に切り替わる結果が発生しているが、夜間の睡眠中ではタイマーによるエアコン停止はあっても窓開閉の居住者自身による能動的な変更は現実的ではないと考えられる。居住者によっては深夜帯に睡眠しないことも考えられるが、NHKの国民生活時間調査[89]では、1:00～5:00の時間帯において、どの年齢層であっても75%以上は睡眠をしているとまとめられている。本章では「夜遅くまで起きている居住者」に着目しておらず、「関東の環境調整行動を一般化したモデル」による居住者行動の再現の検討であることから、多くの居住者が睡眠をする深夜帯に窓開閉を積極的に行うようなシミュレーション結果は、十分ではない。したがって、夜間の窓開閉とエアコン冷房使用の断続的な切り替えが発生は課題点である。これについて、気温だけでなく時刻に応じた制御設定も併用する他、時刻や部屋ごとに応じた環境調整行動モデルを算出する必要性が考えられた。

シミュレーションして得られた窓開放とエアコン冷房の制御結果が、実際の居住者行動とどれくらいフィットしていたのかを確認するために、図6.5にシミュレーション結果による環境調整行動と実際のフィールド調査データにおける環境調整行動の割合を各月ごとにまとめた。窓開放行動をみると、実際の窓開放割合よりもシミュレーション結果による割合の方が高いことがわかった。これは、シミュレーション結果の方が窓開放頻度が多かったことを意味する。一方、各月の推移をみてみると、シミュレーション結果では8月に窓

開放割合が低下するものの、9月から10月にかけて割合が比較的大きく低下することから、各月ごとの窓開放割合の推移傾向は似ていると考えられる。

次にエアコン冷房をみると、こちらではシミュレーション結果による割合よりも実際のフィールド調査のデータによる割合の方が高い傾向であった。各月ごとの割合の推移傾向をみると、6月から8月にかけて上昇し、8月から10月にかけて低下する傾向はシミュレーション結果とフィールド調査のデータとでどちらでもみられた。ただし、9月のエアコン冷房割合に注目すると、フィールド調査のデータでは0.37のためエアコン冷房は使用傾向があるのに対して、シミュレーション結果では0.09のため使用傾向が小さかった。

以上をまとめると、6月から10月にかけて外気温変動を基に窓開放とエアコン冷房使用制御のシミュレーションを試みた結果、各々の行動割合の推移傾向は似ていたものの、窓開放ではシミュレーション結果の方が、エアコン冷房使用では実際のフィールド調査データの方が割合が高い傾向が得られた。特に、9月のエアコン冷房使用について、実際には使用される期間であるものの、シミュレーション結果ではあまり使用されていなかった。

これらの差異の理由としては次の2点が考えられた。1つめは前述の通り、夜間の窓開放の定義である。本章で行なった行動シミュレーションは外気温変動のみに依存したため、時刻に応じた居住者行動設定を併用する必要性が挙げられた。また、先行研究[90]では、防犯や騒音、虫の侵入などの理由から窓を閉鎖すると考える居住者がいることを明らかにしており、窓開放は居住者の好みも関係するだろう。図6.5におけるシミュレーション結果と実際の行動割合の差はこれらの要因が大きく関係していると考えられる。このことから窓開放とエアコン冷房使用のシミュレーションには、次の2点も考慮する必要性がある。

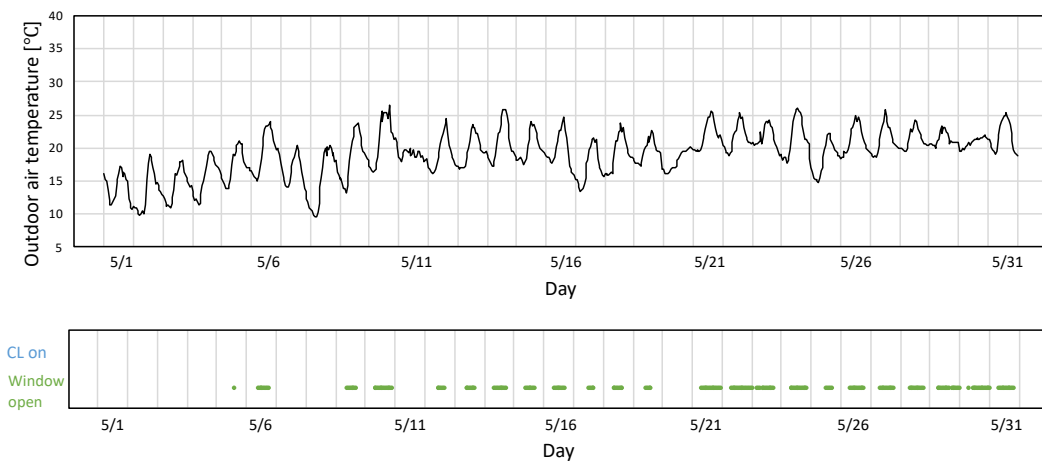
1. 就寝中は居住者自身が能動的に環境調整行動を変更できないことから、窓閉の切替は頻繁に行われない。
2. 防犯や室外環境の観点から、就寝中には窓を閉鎖して就寝する居住者がいる。

2つめに考えられることは、第4章でも述べた「環境調整行動の春・秋の差異」である。第4章では同じ外気温帯であっても気温が上昇する春季と下降する秋季で熱的快適性と環境調整行動が異なることを明らかにしたが、本節で実行した環境調整行動設定(表6.1)は、年間のデータ全体で算出した行動モデルを参考にして外気温閾値を設定したため、気温の上昇期・下降期の違いは考慮されていない。図4.2でも明らかにした通り、同じ外気温帯であっても春季よりも秋季の方が冷房使用は多いことを明らかにしていることから、フィールド調査データの算出割合と同様に9月の冷房使用は少なくないことが考えられる。これらを考慮すると、年間を通したシミュレーションに対して環境調整行動モデルを利用する時には、気温の上昇・下降傾向(春季・秋季)を考慮して環境調整行動モデルを作ることが、より実態に近い環境調整行動制御を行う上で大切であることが明らかになった。

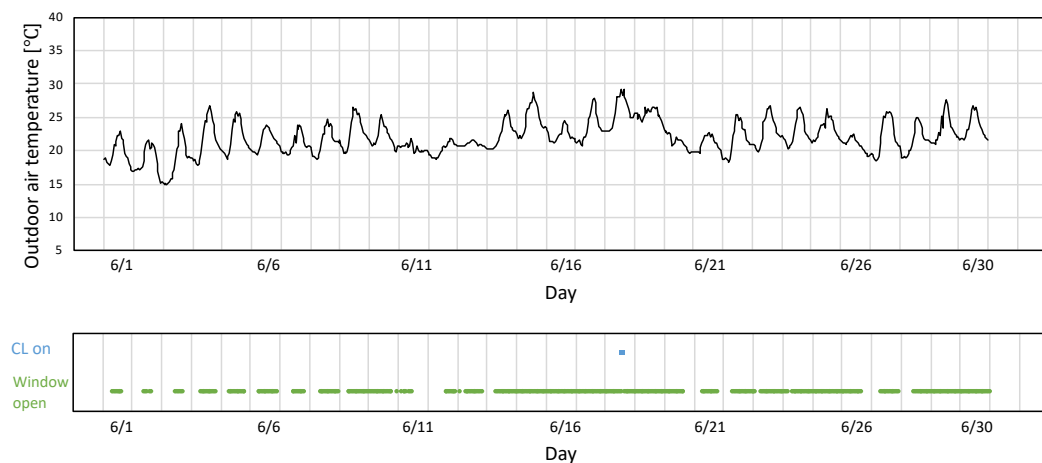
以上をまとめると、環境調整行動モデルを基にした居住者行動制御の設定には、外気温変動だけでなく時刻に応じた設定や居住者自身の好みも反映することが重要であると示唆

された。また、春季・秋季といった気温の上昇・下降傾向を分別して環境調整行動モデルを設定することが、年間を通した環境調整行動設定において必要であると示唆された。

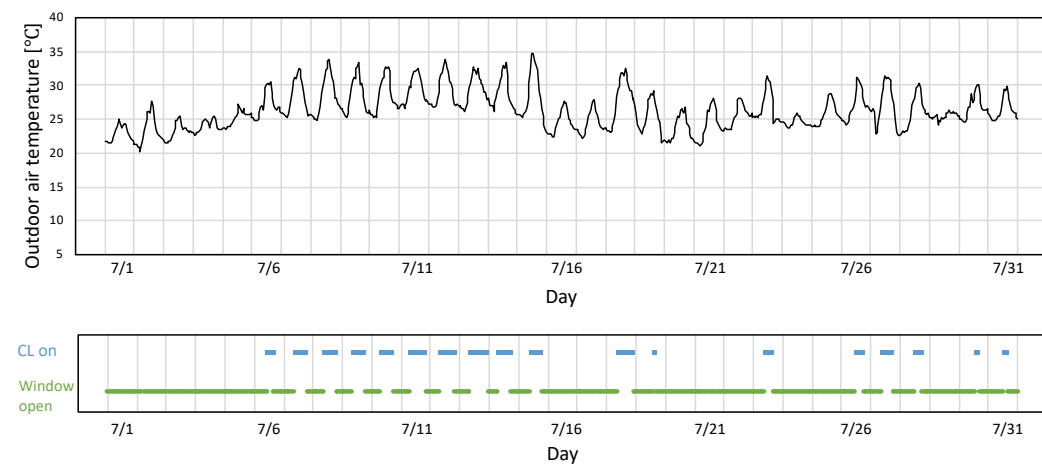
(a)5月



(b)6月

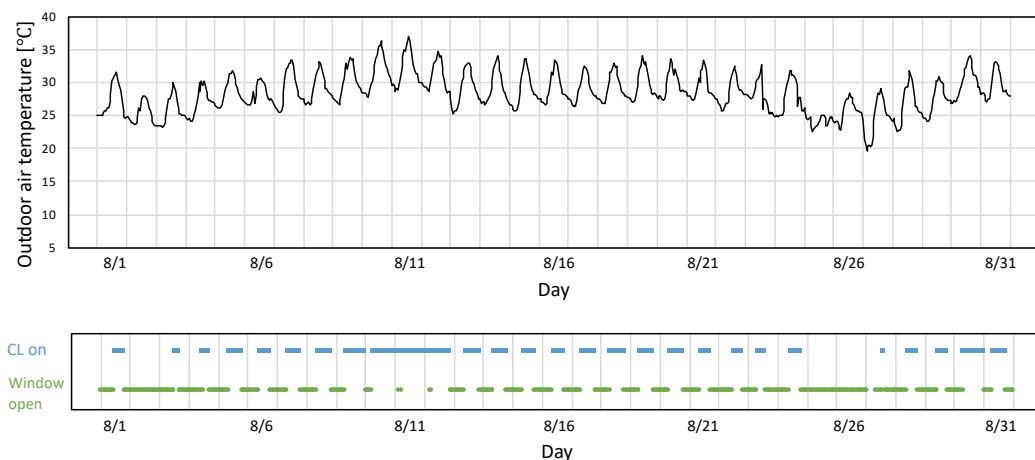


(c)7月

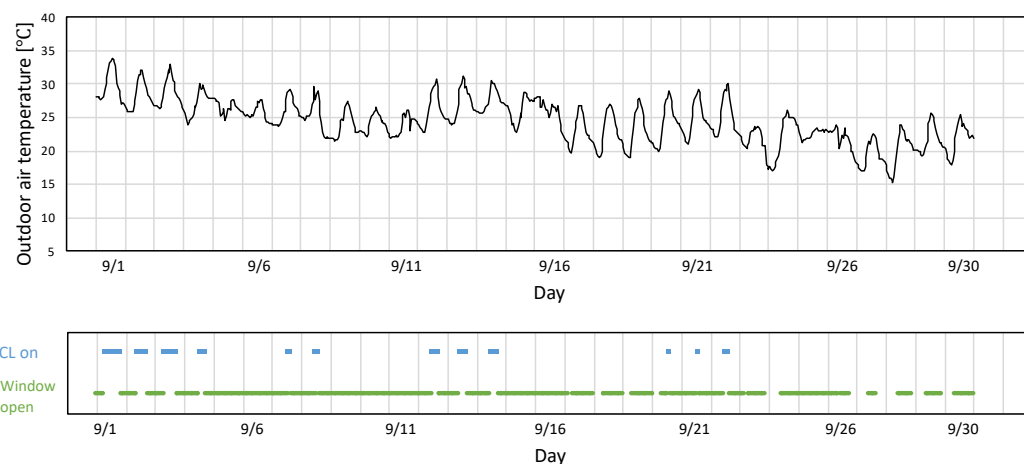


(図 6.3 続く)

(d)8月



(e)9月



(f)10月

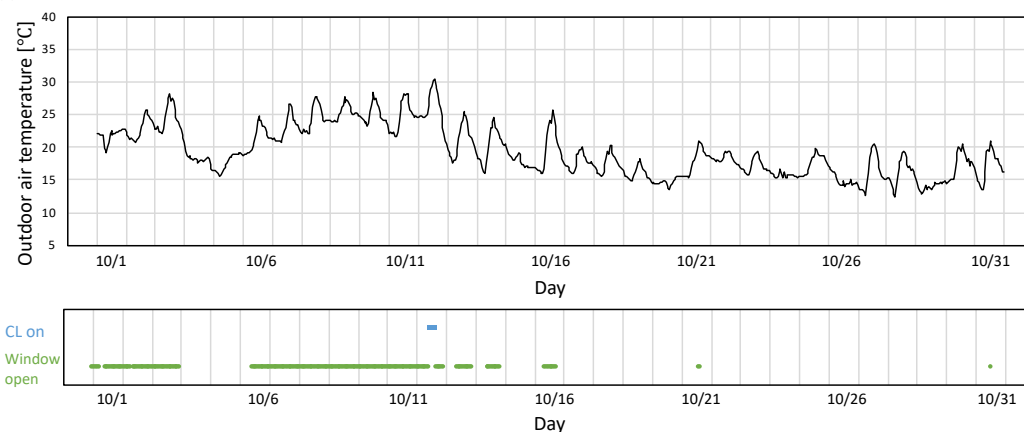


図 6.3 測定された外気温の変動と算出された窓開閉・エアコン冷房使用の制御結果。

(上図の黒の線は外気温。下図は外気温より得られた制御結果であり、青マーカーはエアコン冷房使用時、緑マーカーは窓開放時である。)

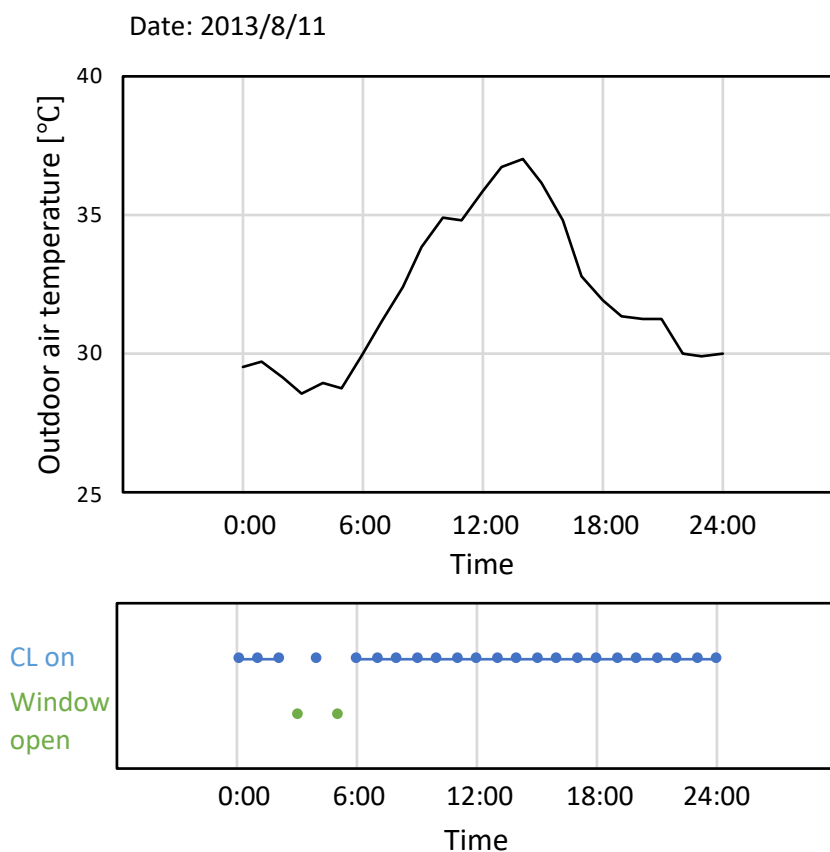


図 6.4 2013/8/11 の外気温変動と窓開閉・エアコン冷房使用の制御結果
 (上図の黒の線は外気温。下図は外気温より得られた制御結果であり、青マーカーはエアコン冷房使用時、緑マーカーは窓開放時である。)

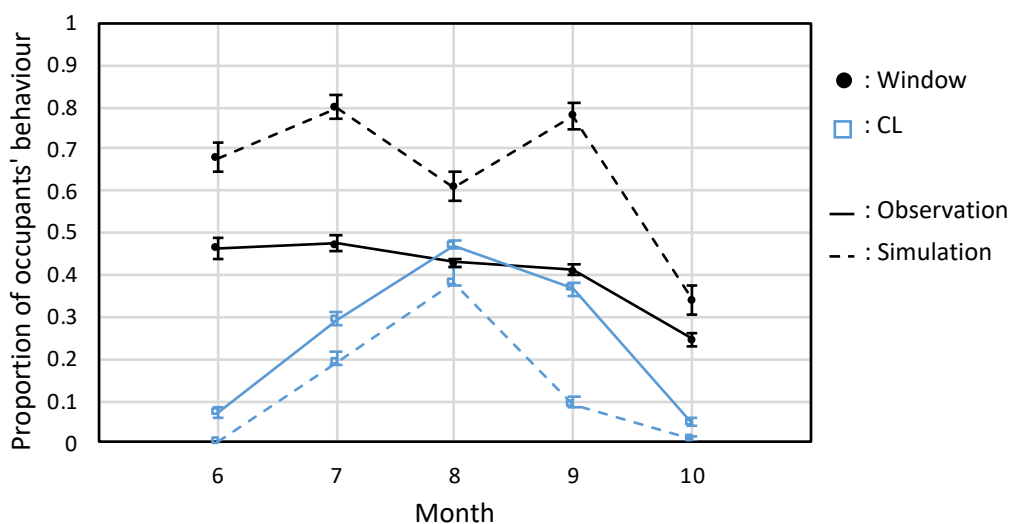


図 6.5 フィールド調査データにおける環境調整行動割合 (図 2.10) とシミュレーション結果における環境調整行動割合

6.6 まとめ

第6章では、第3章で得られた窓開閉・エアコン冷暖房使用モデルを用いて、居住者行動の自動制御方法を検討し、実際に測定された1時間毎の外気温時系列データに適応することで、居住者行動がどのように制御されるのかを分析したことで、建築熱負荷シミュレーションへの応用可能性を検証した。本節では、以下の結論が得られた。

- 1) 統合された窓開閉・エアコン冷暖房使用モデルにおける、環境調整行動割合の大小関係を用いて設定を検討した。20.8~28.8℃では窓開放を、28.9℃以上では窓閉鎖をしてエアコン冷房使用を行うように、外気温閾値を用いた設定を作成することができた。ただし、暖房使用に対する外気温閾値は算出できなかった。この方法では割合が十分に上昇しない環境調整行動に対しては、使用のための外気温閾値を設定できないことが明らかとなった。これらの外気温閾値を環境調整行動の生起を定義してまとめることで、居住者行動制御の設定を作成した。
- 2) 得られた居住者行動制御設定を用いて、2013年の5月1日~10月31日における実際の外気温の1時間ごとの時系列データに適用したところ、窓開閉とエアコン冷房使用を切り替える居住者行動をシミュレーションできた。しかし、8月11日などで見られるように、夜間の一般的な就寝時間において窓開閉とエアコン冷房使用の断続的な切り替えが発生しており、居住者行動の再現を目的とした本研究では課題点として挙げられた。これについては、気温だけでなく時刻に応じた制御設定も併用する他、時刻や部屋ごとに応じた環境調整行動モデルを算出する必要性が考えられた。
- 3) 得られたシミュレーション結果を確認したところ、各月の割合の推移傾向はフィールド調査から得られたデータと同様の傾向を示したが、行動割合値は差があった。また、9月の冷房使用割合は実際よりもシミュレーション結果の方が低かった。これらの結果から、環境調整行動の時間帯や個人の好みに応じた環境調整行動の設定や、春季・秋季ごとの環境調整行動モデルの算出することで、より実態に近い環境調整行動制御の設定が行えることが重要であると考えられた。

7章 総括

7.1 本研究の結論

本研究は関東の住宅で行われたフィールド調査のデータを用いて、従来にない新しい環境調整行動モデルの開発を行い、従来では得られなかった知見を明らかにした。また、これらの環境調整行動モデルを、建築熱負荷シミュレーションの居住者設定へ導入を行った。それぞれの章で得られた主な結果をまとめた。

第1章では、環境調整行動に関するこれまでの研究背景を述べた。適応的な熱的快適性を取得する上で、環境調整行動の実施は重要である。その研究手法の一つに「環境調整行動モデル」が挙げられるが、従来の算出手法では各々の行動の相互関係性が考慮されておらず、また、熱的快適性に応じた行動状態の定義が行われていなかった。そこで、これらの影響要素を考慮した環境調整行動モデルを新たに開発することで、居住者行動の解明に寄与することを目的とした。また新たに開発された環境調整行動モデルを建築熱負荷シミュレーションへ導入することで、シミュレーション精度の向上が見込まれるか、検証を行う。

第2章では、研究方法をまとめた。本研究で用いるデータは2010年から2014年に関東の住宅120世帯で実施されたフィールド調査のデータを用いた。本調査では、環境調整行動と熱的快適性を回答するアンケート申告調査と温湿度を10分ごとに記録する測定調査を同時実施した。得られたデータ数は36154ケースである。

第3章では、日本の居住者にとって身近である環境調整行動のモデル統合を行い、相互関係性を考慮した居住者行動習慣の実体解明を試みた。窓開閉とエアコン冷暖房使用に加えて、扇風機併用モデルも統合することで、窓開閉・エアコン冷暖房・扇風機使用の頻度を相対的に算出できる統合モデルの開発に至った。扇風機は単独使用よりも窓開放やエアコン冷房と併用する方が多いことが明らかとなった。採涼行動割合は外気温19.9℃で0.50となり、28.5℃まで上昇すると0.90にまで達することが明らかとなった。

着衣量についてはエアコン冷房使用時のどの外気温帯でも約0.3cloとなる傾向が強く、エアコン不使用時には外気温低下に応じて着衣量も上昇傾向となる。ただし、窓開放をしたときの方が男性の着衣量は低い傾向が示された。

エアコン設定温度も分析したところ、外気温変動に応じて設定温度は変更されていなかった。エアコン冷房設定温度は外気温以外の変更要因があることが示唆された。

第4章では、同じ外気温帯を持つ春季と秋季では「冬季から気温上昇してきた春季」と「夏季から気温低下してきた秋季」では熱的快適性が異なることで、環境調整行動も異なる可能性を基に、季節遷移期における気温変動方向の差異を環境調整行動モデルにはネイする必要性を検討した。

各季節ごとに環境調整行動モデルを算出したところ、同じ外気温帯であってもエアコン暖房使用は春季の方が、エアコン冷房使用は秋季の方が多いたことが明らかとなった。各月で行動割合を算出した結果、エアコン不使用時の着衣量や窓開放割合、エアコン冷房使用について、同じ外気温帯でも異なる傾向であった。

申告調査で得られた寒暑感申告も用いて各月の平均値を確認したところ、同様に春季と秋季では同じ外気温帯であっても春季の方が暑い側に分布していた。一方で、FRモードの快適温度と外気温の関係性である適応モデルにおいては、春季と秋季で差がないと考えられた。この理由として、春季と秋季で熱的快適性は異なるが、それに応じて環境調整行動も変更していたことで、快適と感じる温度の差はないに等しいことが考えられた。外気温上昇期と下降期ごとにデータを分割することで、気温変動に応じた冷房使用モデルをロジスティック関数を用いて算出した。

第5章では、「熱的快適性を対応づけた環境調整行動モデルの発展可能性」を念頭に、過度なエアコン冷暖房使用モデルの開発を行なった。環境調整行動申告と同時に回答された寒暑感申告を用いて、「冷房使用時に寒く感じている」ケースを過度な冷房使用、「暖房使用時に暑く感じている」ケースを過度な暖房使用と定義し、外気温を説明変数とした行動モデルを開発した。過度な冷房使用割合は外気温が上昇するにつれて増える傾向であった。一方、過度な暖房使用割合は外気温が低下するにつれて増加する傾向を示した。

過度なエアコン使用割合を確認すると、過度なエアコン冷房使用割合は38℃以上で3%以上に達する一方で、過度なエアコン暖房使用割合はどの外気温帯であっても1%未満であり、過度な冷房使用の頻度よりも少ないことが明らかとなった。

第6章では、第3章で得られた窓開閉・エアコン冷暖房使用モデルを用いて、居住者行動の自動制御方法を検討し、実際に測定された1時間毎の外気温時系列データに適用することで、居住者行動がどのように制御されるのかを分析した。20.8~28.8℃では窓開放を、28.9℃以上では窓閉鎖をしてエアコン冷房使用を行うように、外気温閾値を用いた設定を作成することができた。ここから得られた居住者行動制御設定を実際の外気温の時系列データに適用したところ、窓開閉とエアコン冷房使用を切り替える居住者行動をシミュレーションできた。得られたシミュレーション結果を確認したところ、各月の割合の推移傾向はフィールド調査から得られたデータと同様の傾向を示したが、行動割合値は差があった。また、9月の冷房使用割合は実際よりもシミュレーション結果の方が低かった。これらの結果から、環境調整行動の時間帯や個人の好みに応じた環境調整行動の設定や、春季・秋季ごとの環境調整行動モデルの算出することで、より実態に近い環境調整行動制御の設定が行えることが重要であると考えられた。

7.2 本研究の成果に対する制限

本研究で開発された環境調整行動モデルは外気温をベースとして、環境調整行動選択の相互関係性や季節遷移、熱的快適性の観点から発展させた新しいモデルである。その一方で、本研究では十分に反映できなかった課題点も挙げられる。

本研究では外気温を説明変数に設定しているが、環境調整行動の実施の判断は外気温以外の様々な要素も関係していることが考えられた。特に、エアコン設定温度では外気温変動のみでは決定することができず、室内温熱環境や熱的快適性・居住者特性などとの関係性も確認する必要があると考えられた。

また、本研究における環境調整行動モデルは、関東の住宅の傾向を表しているが、年齢や性別、体質、エアコンの好みといった居住者特性に応じたモデル算出には至っていない。また、住宅の立地周辺環境や住宅性能に応じて、環境調整行動選択の差異が現れてくることは推測ができるだろう。本研究では、環境調整行動モデルの算出方法の開発を重心に置いており、これらの居住者特性や居住環境に応じた環境調整行動モデルの算出は行えていない。また、本調査では住宅性能や立地環境に関するデータの収集が十分に行えていないことに加えて、複数人が滞在するリビング空間では誰が空調機器設定の決定権を持っていたのかもデータを収集していなかった。したがって、これらの居住環境や空調機器設定の決定権に関するデータ収集および居住者特性に応じた環境調整行動モデルの算出は、今後の研究余地として残ることとなった。

さらに、2021年現在では感染症問題が世界的に流行しており、そのような状況において「換気」の重要性が挙げられている。住宅において「窓開放」は換気手段の一つであることから、「窓開放を実施しながらエアコンも使用する」ような状況も増えてきている。これは、第3章で取り組んだ窓開閉・エアコン冷暖房使用の相互関係性が弱くなることを意味する。本研究の開始時には「窓開放とエアコン使用の同時実施」を十分に考慮できていない。したがって、感染症対策をはじめとした換気の社会的重要性を今後も把握することで、窓開閉とエアコン冷暖房使用の相互関係性を再確認し、開発モデルを更新していく必要がある。

7.3 今後の展望

本研究で開発された環境調整行動モデルは、建築設計時の居住者行動の把握や建築熱負荷シミュレーションの行動設定にも使用できる見込みがある。これらは、居住者行動の解明や環境設計時の参考資料として使用のほか、エネルギー需要の予測への貢献にもつながることが考えられる。

さらに、近年ではIoT (Internet of Things)の普及によって、様々な物理値を測定できるようになった。さらに、スマートフォンは非常に多くの人々が所有していることを考えると、HEMS (Home Energy Management System)による省エネ性と快適性を両立した生活をサポートできることが考えられる。図7.1は著者が想定するHEMSシステムの一例であ

る。このシステムでは居住者行動状態と室内外温熱環境に加えて、熱的快適性もデータ収集することで、スマートフォン上で居住者行動のアドバイスを提供する仕組みを持っている。工学的に考えると、空調の完全自動制御システムも考えられるが、そうではなく、あくまで居住者自身が行動生起の最終判断を行い、それをサポートする HEMS システムが望ましいと思われる。このような HEMS システムに、本研究の知見が貢献できれば、幸いである。



Figure 7.1 著者が想定する HEMS アプリケーションの情報伝達プロセスの将来像

参考文献

- 1) 新村出(編)：広辞苑 第七版，岩波書店，p. 652, 2018
- 2) 見坊豪紀・金田一京助・金田一春彦・柴田武・市川孝・飛田良文(編)：大きな活字の三省堂国語辞書 第六版，p. 275, 2008
- 3) 大辞泉 第二版 上巻 あーす，小学館，p. 881, 2012
- 4) 松村明(編)：大辞林 第三版，三省堂，p. 552, 2006
- 5) Michael A. Humphreys, Fergus J. Nicol: Understanding the adaptive approach to thermal comfort, ASHRAE Transactions, Vol.104, pp.991-1004. 1998
- 6) Gail S. Brager, Richard J. deDear: Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Building, Vol.27, pp.83-96, 1998.2
- 7) ASHRAE Standard 55: Thermal environment conditions for human occupancy, Atlanta, Georgia, America Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers, 2004
- 8) Comité Europeen de Normalisation (CEN), EN 15251: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. Brussels: CEN, 2007
- 9) CIBSE. Environmental criteria for design. designGuide A: EnvironmentalCIBSE. pp.1-17, 2006
- 10) リジャル H. B. ・梅宮典子訳：適応を考慮した熱的快適性の原理 (M. A Humphreys), 空気調和・衛生工学, Vol. 83, No. 6, pp. 7-13, 2009. 6
- 11) 斉藤雅也・辻原万規彦：ヒトの想像温度と季節感の特性 その1 想像温度と季節感, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 225-226, 41113, 2019. 9.
- 12) 辻田純三・田中信雄・黛誠・掘清記：沖縄への夏季帰省が沖縄より本土に移住したヒトの耐熱性 耐熱性および局所耐寒性に及ぼす影響について 日本熱帯医学会雑誌, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, 1978
- 13) 松本孝朗・小坂光男・菅屋潤壺：熱帯暑熱環境への適応, 日本生気象学会誌, Vol. 36, No. 2, pp. 65-69, 1999
- 14) Basudev Gauta, Hom Bahadur Rijal, Hikaru Imagawa, Genku Kayo & Masanori Shukuya: Investigation of adaptive thermal comfort considering the thermal history of local and migrant peoples living in sub-tropical climate of Nepal, Building and Environment, Vol. 185, 107237, 2020. 11
- 15) 小原淳平：100万人の空気調和，オーム社，1994
- 16) 住環境計画研究所：2014年度版 家庭用エネルギーハンドブック，省エネルギーセンター，2013

- 17) 須藤貞男：家庭用扇風機の歴史と現状，ターボ機械，Vol. 8, No. 7, pp391-397, 1980
- 18) 環境省：「COOL BIZ」の成果について，2005年，
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=6491>（確認：2015年1月29日）
- 19) 2013年度「ウォームビズ」について（お知らせ）2013年。（確認：2015年1月29日）
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17196>
- 20) 環境省におけるクールビズの服装の可否（確認：2020年11月20日）
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/20401.pdf>
- 21) Humphreys A. Michael: The influence of season and ambient temperature on human clothing behaviour, Indoor climate: International indoor climate symposium, 16th Copenhagen, Danish Building Research Institute, pp.700-713, 1978
- 22) Fergus Nicol: Temperature and sleep, Energy and Buildings, Vol.204, 109516, 2019
- 23) Raja A. Iftikhar, Fergus J. Nicol, Kathryn McCartney & Michael A. Humphreys: Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings, Energy and Buildings, Vol.33, Issue 3, pp.235-244, 2001.2
- 24) Jungsoo Kim, deDear Richard, Thomas Parkinson & Christina Candido: Understanding patterns of adaptive comfort behaviour in the Sydney mixed-mode residential context, Energy and Buildings, Vol.141, pp.274-283, 2017.4
- 25) Marina Takasu, Ryozo Ooka, Hom Bahadur Rijal, Madhavi Indraganti & Manoj Kumar singh: Study on adaptive thermal comfort in Japanese offices under various operation modes, Building and Environment, Vol.118, pp.273-288, 2017.6
- 26) Rajan KC, Hom Bahadur Rijal, Masanori SHukuya & Kazui Yoshida: An in-situ study on occupants' behaviors for adaptive thermal comfort in a Japanese HEMS condominium, Journal of Building Engineering, Vol.19, pp.402-411, 2018.9
- 27) 澤地孝男・松尾陽・羽田野健・福島弘幸：暖冷房行為生起の決定要因と許容室温範囲に関する検討 住宅の室内気候形成に寄与する居住者の行動に関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 382, pp. 48-59, 1987.12
- 28) 真嶋一博・梅宮典子・吉田治典・H. B. リジャル：都市内街区における路地の熱的快適性評価 -京都西陣地区における調査-, 日本建築学会環境系論文集, No. 622, pp. 41-48, 2007.12
- 29) 岩下剛・坂元真樹・赤坂裕：夏季の集合住宅における居住者の在室状況と換気量及び室内空気汚染度の時刻変化に関する試験研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 501, pp. 93-99, 1997.11
- 30) Fergus J. Nicol, Iftikhar A Raja, Arif Allaudin & Gul Najam Jamy: Climatic variations in comfortable temperatures: the Pakistan projects, Energy and Buildings, Vol.30, pp.261-279, 1999
- 31) 仲松亮・堤純一郎・新川亮樹・安井文男・斎藤基之・石井昭夫：亜熱帯沖縄における

- 温熱感覚調整要素としての着衣量の実態調査, 日本建築学会環境系論文集, No. 570, pp. 21-27, 2003. 8
- 32) 羽原宏美・鳴海大典・下田吉之・水野稔: 居住者の室内温熱環境調節行為のモデル化による住宅の空調エネルギー消費の予測, 人間と生活環境, Vol. 11, No. 2, pp. 83-88, 2004
- 33) 羽原宏美・鳴海大典・下田吉之・水野稔: 一般住戸を対象とした実態調査に基づく冷房発停の生起要因に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, No. 589, pp. 83-90, 2005. 3
- 34) 猪股悦子・後藤伴延・三田村輝章・吉野博・田村明弘: オフィスにおける在室者の温熱適応性に関する実測調査 その5 着衣量および快適温度に関する考察, 日本建築学会大会学術公演梗概集, 41223, pp. 463-464. 2006. 9
- 35) Michele De Carli, Bjarne W. Olesen, Angelo Zarrella & Roberto Zecchin: People's clothing behaviour according to external weather and indoor environment, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 12, pp. 3965-3973, 2007. 12
- 36) H. B. Rijal, P. Tuohy, M. A. Humphreys, J. F. Nicol, A. Samuel & J. Clarke: Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 39, Issue 7, pp. 823-836, 2007. 7
- 37) Haldi Frédéric & Robinson Darren: Interactions with window openings by office occupants, *Building and Environment*, Vol. 44, Issue. 12, pp. 2378-2395, 2009. 12
- 38) 谷本潤・萩島理: 階層型ニューラルネットワークを適用した住宅における冷房開始確率モデルの構築, Vol. 74, No. 642, pp. 937-942, 2009. 8
- 39) Schweiker Marcel, Shukuya Masanori: Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-unit usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions, *Buidligns and Environment*, Vol. 44, Issue 10, pp. 2137-2149, 2009. 10
- 40) Hom Bahadur Rijal, Paul Tuohy, Michael A. Humphreys, J. Fergus Nicol & Aizaz Samuel: An algorithm to represent occupant use of windows and fans including situation-specific motivations and constraints, *Buidling Simulation*, Vol. 4, Issue 2, pp. 117-134, 2011. 6
- 41) Marcel Schweiker, Frédéric Haldi, Masanori Shukuya & Darren Robinson: Verification of stochastic models of window opening behaviour for residential buildings, *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 5, No. 1, pp. 55-74, 2012. 1
- 42) Runa Andersen, Valentina Fabi, Jorn Toftum, Stefano P. Corgnati & Bjarne W. Olesen: Window opening behaviour modelled from measurements in Danish dwellings, *Building and Environment*, Vol. 69, pp. 101-113, 2013. 11

- 43) Hom Bahadru Rijal, Miho Honjo, Ryota Kabayashi & Takashi Nakaya: Investigation of comfort temperature, adaptive model and the window-opening behaviour in Japanese houses, *Architectural Science Review*, Vol. 56, No. 1, pp. 54-69, 2012. 12
- 44) 高瀬直紀・リジナル H. B. ・吉田一居：オフィスビルにおける執務者の行動的適応に関する実態調査, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 41152, pp. 313-314., 2015. 9
- 45) Schakib-Ekbatan Karin, Fatma Zehra Çakıcı, Marcel Schweiker & Andreas Wagner: Does the occupant behavior match the energy concept of the building? -Analysis of a German naturally ventilated office building, *Building and Environment*, Vol. 84, pp. 142-150, 2015. 1
- 46) Nam Insick, Jinho Yang, Dohee Lee, Eunjung Park & Jong-Ryeul Sohn: A study on the thermal comfort and clothing insulation characteristics of preschool children in Korea, *Building and Environment*, Vol. 92, pp. 724-733, 2015. 10
- 47) Nan Li, Jungcheng Li, Ruijuan Fan & Hongyuan Jia: Probability of occupant operation of windows during transition seasons in office buildings, *Renewable Energy*, Vol. 73, pp. 84-91, 2015. 1
- 48) Hom Bahadur Rijal, Fergus Nicol & Michael Humphreys: Adaptive thermal comfort in Japanese houses during the summer season: Behavioral adaptation and the effect of humidity, *Buildings*, Vol. 5, No. 3, pp. 1037-1054, 2015. 9
- 49) Monoj Kumar Singh, Ryoza Ooka, Hom B. Rijal & Marina Takasu: Adaptive thermal comfort in the offices of North-East India in autumn season, *Building and Environment*, Vol. 124, Issue 1, pp. 14-30, 2017. 11
- 50) Francesca Stazi, Federica Naspi & Marco D'Orazio: Modelling window status in school classrooms. Results from a case study in Italy, *Building and Environment*, Vol. 111, pp. 24-32, 2017. 1
- 51) Yu Jiao, Hang Yu, Tian Wang, Yusong An & Yifan Yu: The relationship between thermal environments and clothing insulation for elderly individuals in Shanghai, China, *Journal of Thermal Biology*, Vol. 70, pp. 28-36, 2017. 12
- 52) PanSong, Yingzi Xiong, Yiye Han, Xingxing Zhang, Liang Xia, Shen Wei, Jinshun Wu & Mengjie Han: A study on influential factors of occupant window-opening behavior in an office building in China, *Building and Environment*, Vol. 133, pp. 41-50, 2018. 4
- 53) Weiwei Liu, Diyu Yang, Xiong Shen & Peizhi Yang: Indoor clothing insulation and thermal history: A clothing model based on logistic function and running mean outdoor temperature, *Building and Environment*, Vol. 135, Issue 1, pp. 142-152, 2018. 5
- 54) Chengcheng Xu, Shuhong Li, Xiaosong Zhang & Suola Shao: Thermal comfort and

- thermal adaptive behaviours in traditional dwellings: A case study in Nanjing, China, *Building and Environment*, Vol.142, pp.153-170, 2018.9
- 55) Hom Bahadur Rijal: Chapter 26 Occupant Behaviour in the Various Climates of Nepal, *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia* (edited by Tetsu Kubota, Hom Bahadur Rijal & Hiroto Takaguchi), Springer, 2018.
- 56) Monoj Kumar Singh & Sanjay Kumar: Field investigation on occupant's thermal comfort and preference in naturally ventilated multi-storey hostel buildings over two seasons in India, *Building and Environment*, Vol.163, 106309, 2019.10
- 57) 新谷裕太・リジャル H. B.・今川光: 関東地方のオフィスビルにおける作業効率と快適感に関する研究, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 41276, pp. 569-570, 2019.9
- 58) Hom Bahadur Rijal, Michael A. Humphreys & Fergus J. Nicol: Study on behavioural adaptation for the thermal comfort and energy saving in Japanese offices, *Journal of the Institute of Engineering*, Vol.15, No.3, pp.292-299, 2019.10
- 59) Basudev Gautam, Hom Bahadur Rijal & Masanori Shukuya: Investigation on Wintry Thermal Comfort in Traditional Houses of Nepalese Three Climatic Regions, *Journal of the Institute of Engineering*, Vol.15, No.3, pp.133-140, 2019.10
- 60) Akito Nakagawa, Hiroki Ikeda, Yoshihiro Maeda & Takashi Nakaya: A survey of high school students' clothing in classroom, *Journal of Building Engineering*, Vol. 32, 101469, 2020.11
- 61) Chenqiu Du, Wei Yu, Yanjiong Ma, Qicong Cai, Baizhan Li, Nan Li, Wenbo Wang & Runming Yao: A horistic investigation into the seasonal and temporal variations of window opening behavior in residential buildings in Chongqing, China., *Energy and Buildings*, Vol.231, Issue 15, 110522, 2020.10
- 62) 坪田祐二・中山和美・間純一: 夏期の住宅における窓の開放に関する調査研究 首都圏におけるインターネットアンケート調査による窓の開放の意識と実際の窓の開放, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.77, No.676, pp.515-521, 2012.6
- 63) 三菱電機ビルテクノサービス: ビジネスパーソン1,000名に聞く、夏のオフィスのエアコンに関する意識と実態調査, 2016年7月7日。(確認日: 2020年11月24日)
<https://www.meltec.co.jp/press/AC.html>
- 64) 勝野二郎・リジャル H. B.・宿谷昌則: 夏季のリビングにおける居住者の快適温度と熱的適応に関する研究, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.80, No.707, pp.13-20, 2015.1
- 65) 今川光・リジャル H. B.・宿谷昌則: 寝室の快適温度と環境調整行動に関するフィールド調査, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.81, No.728, pp.875-883, 2016.10.
- 66) 源城かほり: 温暖地である長崎県内の住宅における快適温度と適応モデルに関する研究, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.85, No.774, pp.603-613, 2020.8
- 67) 高田真人・梅干野晁: 数値シミュレーションによる江戸町屋敷の空間特性と表面温度

- および大気への顕熱負荷との関係の把握-江戸時代後期の江戸町人地における居住者の生活行動を考慮した夏季熱環境の評価 その3-, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 78, No. 693, pp. 827-833 2013. 11
- 68) 高田真人・村上暁信・梅干野晁：江戸および明治時代の史料にみられる江戸町屋敷居住者の夏季の滞在空間と環境調整行動-江戸時代後期の江戸町人地における居住者の生活行動を考慮した夏季熱環境の評価 その2-, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 76, No. 661, pp. 307-316, 2011. 3
- 69) Hom Bahadur Rijal, Michael A. Humphreys & Fergus J. Nicol: Development of a window opening algorithm based on adaptive thermal comfort to predict occupant behavior in Japanese dwellings, Japan Architectural Review, Vol. 1, No. 3, pp. 310-321, 2018. 7
- 70) Marcel Schweiker & Masanori Shukuya: Comparative effects of building envelope improvements and occupant behavioural changes on the exergy consumption for heating and cooling, Energy Policy, Vol. 38, Issue 6, pp. 2976-2986, 2010. 6
- 71) 小玉祐一郎・武政孝治・宮岡大・松元良枝：ESP-r と Radiance による建築環境シミュレーション入門, オーム社, 2011
- 72) 家入龍太：図解入門 よくわかる最新 BIM の基本と仕組み [第2版], 秀和システム, p. 10, 2019
- 73) 株式会社 LIXIL：自然換気と空調制御の調査で”呼吸するオフィス”を実現する新技術と、“フレームレス”で美しいデザインと高い断熱性能を併せ持つ新構法を LIXIL 新本社の新棟ファザードに採用～健康で快適なオフィス空間の実現と、持続可能な社会に向けて～, 2020年5月21日（確認日：2020年11月21日）
- 74) ヒューリック株式会社：CSR REPORT 2011（確認日：2020年11月21日）
- 75) 国土交通省：過去の気象データ検索（確認日：2018年7月8日）
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 76) OMソーラー株式会社（確認日：2015年11月8日。）<http://omsolar.jp/>
- 77) Francesca Stazi, Federica Naspi, Giulia Ulpiani & Costanzo Di Perna: Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing, Energy and Buildings, Vol. 139, pp. 732-746, 2017. 3
- 78) University of Strathclyde. ESP-r | University of Strathclyde（確認日：2020年11月23日）
<https://www.strath.ac.uk/research/energysystemsresearchunit/applications/esp-r/>
- 79) EnergyPlus（確認日：2020年11月23日。）<https://energyplus.net/>
- 80) The BEST Program 【ザ・ベスト・プログラム】 建築物総合エネルギーシミュレーション

- ョンツール (確認日: 2020 年 11 月 23 日) <http://www.ibec.or.jp/best/>.
- 81) 羽原宏美: ロジスティック回帰分析による居間におけるエアコン・窓操作の生起要因に関する分析 住宅における居住者の通風・冷房行為に関する実態調査, 日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.715, pp.827-837, 2015.9
 - 82) Hongwei Guo: A simple algorithm for fitting a Gaussian function, IEEE Signal Processing Magazine, Vol.28, No.5, pp.134-137, 2011
 - 83) 大石進一: 理工学系の数学入門コース フーリエ解析, 岩波書店, 1989
 - 84) 室恵子: 住宅における暖冷房機器の使用および着衣量に関する実態調査, 日本建築学会技術報告集, Vol.24, No.56, pp.253-258, 2018.2
 - 85) 糸井川高穂: 高齢者の冷房を使用する理由と設定室温-エアコンの使用に関する実態調査-, 日本建築学会環境系論文集, Vol.82, No.734, pp.377-383, 2017.4
 - 86) Hom Bahadur Rijal, Micael A. Humphreys & Fergus Nicol: Towards an adaptive model for thermal comfort in Japanese offices, Building Research and Information, Vol.45, No.6, pp.717-729, 2017
 - 87) Griffiths I.D.: Thermal comfort in buildings with passive solar features: Field studies. Report to the Commission of the European Communities. EN3S-090 UK: University of Surrey Guildford, 1990
 - 88) 久野覚・大野秀夫・中原信夫: 温熱環境が変化する場合を含んだ温冷感評価について - 寒暑感と涼暖感-, 日本建築学会学術講演梗概集, 4272, pp. 543-544, 1985.10
 - 89) NHK 放送文化研究所: 国民生活時間調査 (確認日: 2021 年 1 月 21 日) <https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/>
 - 90) 鈴木憲三・松原斎樹・森田大・澤地孝男・坊垣和明: 札幌, 京都, 那覇の公営集合住宅における暖冷房環境の比較分析 暖冷房使用に関する意識と住まい方の地域特性と省エネルギー対策の研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, Vol.475, pp.17-24, 1995.9

業績一覧

(1) 査読付き雑誌論文 9件

- 1). 新井溪・今川光・繪本詩織・橋本哲・リジナル H.B.・宿谷昌則：**湿度条件の違いが想像温度に及ぼす影響に関する研究**, 空気調和・衛生工学会論文集, No.288, pp.13-20, 2021.3
- 2). Basudev Gautam, Hom Bahadur Rijal, Hikaru Imagawa, Genku Kayo & Masanori Shukuya: **Investigation on adaptive thermal comfort considering the thermal history of local and migrant peoples living in sub-tropical climate of Nepal**, *Building and Environment*, 107237, 2020.9
- 3). Hikaru Imagawa, Hom Bahadur Rijal & Masanori Shukuya: **Development of integrated occupant-behavioural stochastic model including the fan use in Japanese dwellings**, *Energy and Buildings*, Vol. 224, No. 1, 110326, 2020.11
- 4). Fergus Nicol, Hom Bahadur Rijal, Hikaru Imagawa & Rita Thapa: **The range and shape of thermal comfort and resilience**, *Energy and Buildings*, Vol. 224, No. 1, 110277, 2020.10
- 5). Basudev Gautam, Hom Bahadur Rijal, Masanori Shukuya & Hikaru Imagawa: **A field investigation of the wintry thermal comfort and clothing adjustment of residents in traditional Nepalese houses**, *Journal of Building Engineering*, Vol. 26, 100886, 2019.11
- 6). 今川光・リジナル H.B.・宿谷昌則：**関東の住宅における窓開閉・冷暖房使用の相対的行動モデルの提案**, 日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第763号, pp.855-864, 2019.9
- 7). Rita Thapa, Hom Bahadur Rijal, Masanori Shukuya & Hikaru Imagawa: **Study on the wintry thermal improvement of makeshift shelters built after Nepal earthquake 2015**, *Energy and Buildings*, Vol. 199, No. 15, pp.62-71, 2019.9
- 8). 今川光・リジナル H.B.・宿谷昌則：**寝室の快適温度と環境調整行動に関するフィールド調査**, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第728号, pp.875-883, 2016.10
- 9). Hikaru Imagawa & Rijal Hom Bahadur: **Field survey of the thermal comfort, quality of sleep and typical occupant behaviour in the bedrooms of Japanese houses during the hot and humid season**, *Architectural Science Review*, Vol. 58, No.1, pp.11-23, 2014.11

(2) 国際会議論文 6件

- 10). Hikaru Imagawa & Hom Bahadur Rijal: **Consideration of seasonal history in transition season: the case of occupant behaviours and thermal comfort in Japanese dwellings**, *11th Windsor Conference 2020 -Resilient Comfort-*, UK, (COVID-18 流行の問題のため、Proceeding 掲載のみ)
- 11). Hikaru Imagawa, Hom Bahadur Rijal & Masanori Shukuya: **Development of single and combined fan-use model in Japanese dwellings**, *Sustainable Built Environment Conference 2020*, Tokyo, 2019/8/6-2019/8/7
- 12). Rita Thapa, Hom B. Rijal, Masanori Shukuya & Hikaru Imagawa: **Study on winter indoor thermal environment of temporary shelters built in Nepal after massive earthquake 2015**, *Sustainable Built Environment Conference 2020*, Tokyo, 2019/8/6-2019/8/7
- 13). Hikaru Imagawa, Rijal H.B. & Masanori Shukuya: **Study on the stochastic model for excessive air conditioning use in Japanese dwellings**, *4th International Conference on Renewable Energy Technology for Rural and Urban Development (RETRUD-18)*, Nepal, 2018/10/29-2018/10/31
- 14). Rita Thapa, H.B. Rijal, Masanori Shukuya & Hikaru Imagawa: **Study on winter indoor thermal environment of temporary shelters built in Nepal after massive earthquake 2015**, *4th International Conference on Renewable Energy Technology for Rural and Urban Development (RETRUD-18)*, Nepal, 2018/10/29-2018/10/31
- 15). Hikaru Imagawa & H.B. Rijal: **Survey on the thermal comfort and occupant behaviour in the bedrooms of Japanese houses**, *8th Windsor Conference -counting the cost of comfort in a changing world-*, UK, 2014/4/10-2014/4/13

(3) その他（国内学会発表、研究会、紀要・論集など） 31 件

3)-a 国内シンポジウム

16). リジナル H.B.・今川光：**適応モデルと居住者の環境調整行動**，第 49 回熱シンポジウム 人の環境行動をひきだすバイオクライマティックデザイン，信州大学 長野（工学）キャンパス，2019/10/26-2019/10/27

3)-b 国内学会発表

- 17). 今川光・リジナル H.B.：**日本の住宅における性別と環境調整行動モデルに関する研究**，2020 年度日本建築学会関東支部研究発表会，2021/3/2-2021/3/3
- 18). 楊逸飛・リジナル H.B.・今川光：**中国吉林省の冬季における寝室の温熱環境と熱的快適性に関する研究**，2020 年度日本建築学会関東支部研究発表会，2021/3/2-2021/3/3
- 19). 今川光・リジナル H.B.・宿谷昌則：**住宅におけるエアコン不使用時の環境調整行動に応じた快適温度に関する検討**，令和 2 年度空気調和・衛生工学会大会[オンライン]，2020/9/9-2020/9/30
- 20). 今川光・リジナル H.B.：**関東の住宅における FR モードの室内温度傾向と着衣量に関する検討**，2020 年度日本建築学会大会[関東]，40493，千葉大学西千葉キャンパス，2020/9/8-2020/9/10
- 21). B. Gautam, H.B. Rijal & H. Imagawa: **Study on summer thermal environment and its impact on sleeping in wooden and concrete house of Nepal**, 2020 年度日本建築学会大会[関東]，40371，千葉大学西千葉キャンパス，2020/9/8-2020/9/10
- 22). 繪本詩織・西野淳・今川光・加用現空・リジナル H.B.・宿谷昌則：**ヒューマンファクターを考慮した環境制御に関する研究（その 2）外気温の違いを考慮した温熱環境制御による温熱快適性の改善**，2020 年度日本建築学会大会[関東]，40984，千葉大学西千葉キャンパス，2020/9/8-2020/9/10
- 23). 今川光・リジナル H.B.：**関東の住宅におけるエアコン冷房設定温度の選択傾向と適応選択性に関する検証**，2019 年度日本建築学会関東支部研究発表会，4035，日本大学駿河台キャンパス，2020/3/2-2020/3/3
- 24). Rita Thapa, H.B. Rijal, L. Shakya & H. Imagawa: **Gorkha earthquake 2015: Its impacts on social life and environmental factors**, 2019 年度日本建築学会関東支部研究発表会，4007，日本大学駿河台キャンパス，2020/3/2-2020/3/3
- 25). 今川光・リジナル H.B.：**関東の住宅における窓・エアコン使用の状況と着衣量の関係性に関する分析**，平成 31 年度空気調和・衛生工学会大会（札幌），K-17，北海道科学大学，2019/9/18-2019/9/20
- 26). 新井溪・今川光・繪本詩織・橋本哲・リジナル H.B.・宿谷昌則：**冬季の室内湿度の違いと想像温度の関係性に関する人工気候室における実験研究**，平成 31 年度空気調和・衛生工学会大会（札幌），J-2，北海道科学大学，2019/9/18-2019/9/20
- 27). 今川光・リジナル H.B.・宿谷昌則：**関東の住宅における着衣量・快適温度の春と秋の異同性に関する検討**，2019 年度日本建築学会大会[北陸]，41307，金沢工業大学扇が丘キャンパス，2019/9/3-2019/9/6
- 28). 新谷裕太・リジナル H.B.・今川光：**関東地域のオフィスビルにおける作業効率と快適感に関する研究**，2019 年度日本建築学会大会[北陸]，41276，金沢工業大学扇が丘キャンパス，2019/9/3-2019/9/6
- 29). 楊逸飛・リジナル H.B.・今川光：**日本と中国の睡眠時間と通勤時間に関する文献調査に基づく実態把握**，2019 年度日本建築学会大会[北陸]，41266，金沢工業大学扇が丘キャンパス，2019/9/3-2019/9/6
- 30). 繪本詩織・橋本哲・今川光・久我俊介・リジナル H.B.・宿谷昌則：**ヒューマンファクターを考慮した環境制御に関する研究（その 1）湿度の違いが温熱快適性と皮膚血流量へ与える影響**，2019 年度日本建築学会大会[北陸]，41649，金沢工業大学扇が丘キャンパス，2019/9/3-2019/9/6
- 31). Rita Thapa, H.B. Rijal, Masanori Shukuya & Hikaru Imagawa: **Evaluation of summer indoor conditions of makeshift temporary shelters built after Nepal earthquake 2015**, 2019 年度日本建築学会大会[北陸]，41184，金沢工業大学扇が丘キャンパス，2019/9/3-2019/9/6
- 32). 今川光・リジナル H.B.・宿谷昌則：**関東の住宅におけるエアコン設定温度の適応的選択に関する検証**，2018 年度日本建築学会関東支部研究発表会，4033，日本大学駿河台キャンパ

- ス, 2019/3/6-2019/3/7
- 33). Rita Thapa, H.B. Rijal, M. Shukuya & H. Imagawa: **An investigation of thermal characteristics of temporary shelters in Nepal during wintery night time**, 2018年度日本建築学会関東支部研究発表会, 4020, 日本大学駿河台キャンパス, 2019/3/6-2019/3/7
 - 34). 今川光・リジナル H.B.・宿谷昌則: **住宅における暖房使用と暑さに関する研究**, 平成30年度空気調和・衛生工学会大会, C-54, 大同大学滝春キャンパス, 2018/9/12-2018/9/14
 - 35). 今川光・リジナル H.B.: **外気温に基づく環境調整行動モデルの春と秋に関する研究**, 2018年度日本建築学会大会[東北], 41146, 東北大学川内北キャンパス, 2018/9/4-2018/9/6
 - 36). 新谷裕太・リジナル H.B.・今川光: **関東地域のオフィスビルにおける着衣量の快適温度に関する研究**, 2018年度日本建築学会大会[東北], 41146, 東北大学川内北キャンパス, 2018/9/4-2018/9/6
 - 37). 今川光・リジナル H.B.: **住宅における冷房使用と寒さに関する研究**, 平成29年度空気調和・衛生工学会大会, I-67, 高知工科大学香美キャンパス, 2017/9/13-2017/9/15
 - 38). 新谷裕太・リジナル H.B.・今川光: **オフィスビルにおける温熱環境と着衣量に関する研究**, 平成29年度空気調和・衛生工学会大会, I-39, 高知工科大学香美キャンパス, 2017/9/13-2017/9/15
 - 39). 今川光・リジナル H.B.: **Mixed モードの窓開放割合の算出方法に関する検討 ロジスティック回帰とガウス関数の比較**, 2017年度日本建築学会大会[中国], 40550, 広島工業大学五日市キャンパス, 2017/8/31-2017/9/3
 - 40). 今川光・リジナル H.B.: **外気温変動に基づく寝室の環境調整行動に関するフィールド調査**, 2016年度日本建築学会関東支部研究発表会, 4076, 日本大学駿河台キャンパス, 2017/2/27-2017/2/28
 - 41). 今川光・リジナル H.B.・宿谷昌則: **ロジスティック回帰分析に基づく寝室における居住者特性別の窓開放行動に関する実態調査**, 2016年度日本建築学会大会[九州], 40545, 福岡大学七隈キャンパス, 2016/8/24-2016/8/26
 - 42). 今川光・リジナル H.B.・大森敏明・宿谷昌則: **集合住宅における床暖房およびエアコン暖房のうるささ感に関する研究**, 2015年度日本建築学会関東支部研究発表会, 4054, 日本大学駿河台キャンパス, 2016/3/1-2016/3/2
 - 43). 今川光・リジナル H.B.: **寝室における冷房と扇風機の使用に関する実態調査**, 2015年度日本建築学会大会[関東], 41158, 東海大学湘南キャンパス, 2015/9/4-2015/9/6
 - 44). 今川光・リジナル H.B.: **寝室における環境調整行動の季節差に関する研究**, 2014年度日本建築学会関東支部研究発表会, 4015, 日本建築学会駿河台キャンパス, 2015/3/2-2015/3/3
 - 45). 今川光・リジナル H.B.: **関東の寝室における夏と秋の熱的快適性と環境調整行動に関する研究**, 2014年度日本建築学会大会[近畿], 41224, 神戸大学鶴甲第1キャンパス, 2014/9/12-2014/9/14
 - 46). 今川光・リジナル H.B.: **寝室における夏と秋の熱的快適性と睡眠の深さに関する実態調査**, 2013年度日本建築学会関東支部研究発表会, 4024, 日本大学駿河台キャンパス, 2014/2/20-2014/2/21

以上

謝辞

本学位論文では、指導教員である東京都市大学環境学部環境創生学科のリジナルホームバハドゥル教授から研究全般において懇切丁寧なご指導を賜りました。学部時代では寝室の温熱快適性と環境調整行動に関するフィールド調査を通して、熱的快適性や統計解析手法を経験することができました。さらに、学部4年生の時点で国内外の国際発表、査読付き雑誌論文に挑戦できたのも、リジナル教授のサポートによるところでした。修士課程では、研究テーマを心理実験的アプローチに調整しましたが、リジナル教授が受け入れていただいたため行うことができました。修士課程の修了後も、研究指導やミーティング、学会発表などご指導いただいております。博士後期課程では東京都市大学研究助手や日本学術振興会特別研究員として研究できたのも、学部時代からの指導によるところが大きいです。

宿谷昌則名誉教授には、修士課程1年生の時から副指導教員としてお世話になりました。私が修士課程1年の時に挑戦した日本建築学会環境系論文集への査読付き雑誌論文の執筆時にも、共著者として毎週のミーティングの機会を作っていただいたことで、適応的な温熱快適性への理解が進んだと感じております。その後もゼミや大会発表論文、査読雑誌論文の執筆などを通して、助言をいただいております。そのこともあり、共著者としてサポートをいただいた3本の査読雑誌論文が現在までに採用・掲載に至ることができました。これまでの指導も含めて、本学位論文においては外部審査員として指導をいただくことができました。ありがとうございました。

加用現空准教授には、副指導教員として2年間、ゼミを通してサポートをいただく機会がありました。また、リジナル研究室所属学生の研究に対しても、多くの指導をいただいたおかげで、共同執筆者である私自身も成長できた部分があったと感じております。例えば、本研究で中心に取り扱っている「環境調整行動モデル」の利用手段として、エネルギー需要の予測にも関わってくるといった知見を加用准教授から教授いただいております。外気温を用いた割合予測として本論文や学会発表論文で取り組むこともできました。ありがとうございました。

東京都市大学環境学部環境創生学科の室田昌子教授と田中章教授には、本博士学位論文の内部審査委員として助言をいただきました。私はこれまでに、建築温熱環境分野の先生方・専門家の方々と意見をいただき研究を進めてきたため、離れた分野の先生方にもご意見いただけたことは貴重であったと思います。また、住宅温熱環境の研究に取り組む私にとって「環境」というと住宅内を想定しておりますが、分野外のためにもより明確な説明が必要であったことも大切なことでした。ありがとうございました。

また、これまでの研究室活動内では、多くの所属学生と関わる機会がありました。研究室配属当時は先輩方から指導いただいたり同期として共に進む機会があり、それ以降も後輩や先輩として助言・サポートする機会があり、自分自身の成長に少しでもつながったと思います。

最後に、両親と祖父母には多くの心配をかけてしまいましたが、長きにわたり私の生活を支えていただきました。両親と祖父母の支えがなければ、私の研究生活はありませんでした。本当にありがとうございました。