

夏及び秋における住宅の窓開閉に関する研究

4.環境工学-11.自然エネルギー

準会員 ○ 細川陽平^{*1}正会員 H.B.リジャル^{*2}

住宅 リビング 窓開閉
自然換気 気温 ロジスティック回帰

1. はじめに

近年、住宅でも機械換気や冷房の普及によって窓開閉による自然換気が減少していると思われる。また、日本の夏は高温多湿で温暖化も相まって、夏季における熱環境の改善は重要な課題である。そして、窓開閉が冷房使用による環境負荷低減に有効的であると思われる。よって、夏季及び中間期に窓開放によりいかに自然通風を取り入れ、冷房期間をできるだけ短くすることが重要であると考えられる。

窓開閉に関する国内外の既往研究は大学キャンパス¹⁾、2)、オフィスビル³⁾、戸建て住宅⁴⁾などでみられる。また、海外でも同様に集合住宅⁵⁾やオフィスビルの研究がみられる⁶⁾⁷⁾。しかしながら、国内外の住宅における研究例が少ないため、居住者の窓開閉による環境調節行動について明らかではない。

住宅ではオフィスビルに比べて、窓開放の制約が少ないため、居住者が積極的に窓を開放して室内環境を調節すると思われる。また、オフィスビルでは作業効率を向上させるために冷暖房を使用して室内環境を調節するケースが多いが、住宅では冷暖房の使用が家庭の経済に直接的に関係するため、窓を開放して室内環境を調節するケースが多い。このように、オフィスビルと住宅では窓開閉の行動が異なるため、住宅でも窓開放に関する研究を行う必要がある。

本研究では、関東地方の住宅を対象に夏と秋の温熱環境実測と住居の窓開閉調査を行い、窓開閉と気温の関係について明らかにする。また、居住者の窓開閉数と気流感の関係性を分析した結果を報告する。

2. 調査方法

調査は関東地方の住宅を対象とし、実測調査は2010年夏から秋(7月6日～10月11日:計13週間)にかけて行った。対象とする申告者の年齢は13～64歳で、男性15名、女性14名計29名である。室温と相対湿度は小型温湿度計を用いて10分ごとに測定した。測定高さは床上約110cmである。測定機器は居住者の邪魔にならない場所に設置した。窓開閉の調査はリビングにおいて居住者に

対して1日に何回かバイナリ形式(0=窓閉鎖、1=窓開放)に記録した。気流感申告は7段階尺度で行った。表2に気流感の尺度を示す。また、表1に調査対象世帯の概要を示す。

表1 調査対象世帯の概要

所在地	住宅名	種類	構造	冷房有無
東京	A	戸建て	木造	無
	B	集合住宅	鉄骨造	有
	C	戸建て	木造	有
横浜	D	戸建て	木造	無
	E	戸建て	木造	有
	F	集合住宅	鉄骨造	無
	G	集合住宅	鉄骨造	有
	H	アパート	RC造	有
	I	戸建て	木造	有
	J	アパート	鉄骨造	有
三浦	K	戸建て	木造	有

表2 気流感尺度

今、扇風機・自然の風をどのように感じていますか?	
尺度	項目
1	とても風が弱い
2	風が弱い
3	やや風が弱い
4	ちょうどよい
5	やや風が強い
6	風が強い
7	とても風が強い

3. 分析方法

既往研究では、窓開閉と室温や外気温の関係性を分析するために、ロジスティック回帰を用いている⁶⁾⁷⁾。本研究でも同じ方法を用いて分析する。ロジスティクス回帰は下記に示す。

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = bT + c \quad (1)$$

$$p = \frac{e^{bT+c}}{1 + e^{bT+c}} \quad (2)$$

p : 窓開閉の割合、 b : 回帰係数、 T : 気温(°C)、 c : 定数、 e : 指数関数である。

4. 結果と考察

4.1 窓の開閉状況

居住者が行った窓開閉の状況を把握するために、世帯ごとに分析し、各世帯の窓開放の平均値を比較する。また冷房の使用時で窓開閉に違いがあるかを明らかにする

ために NV モード（自然換気）と AC 冷房モード（冷房）に分類し、両者の差を分析する。NV モードは自然換気及び扇風機、AC モードはエアコン及びドライを使用した場合を示す。NV モードでの扇風機使用割合は 90.7%である。

図 2 に窓開閉調査時の室温分布を示す。NV モードでの室温平均値は 28.4℃、標準偏差は 2.8℃、サンプル数は 1,307 である。AC モードの室温平均値は 26.3℃、標準偏差は 1.9℃、サンプル数は 792 である。NV モードと AC モードでは申告時に平均室温が約 2℃差がある。

図 1 に各世帯の窓開放の 95%信頼区間を示す。図 1 を見ると B 邸ではほとんど窓を開放していないが、F 邸では常に窓を開放して室内環境を調節していることがわかる。特に A 邸、D 邸、F 邸は窓開放の割合が高く、共通しているのはリビングに冷房がない事である。リビングに冷房がないため、窓開放によって温熱環境を調節していると想像できる。

表 3 に自然換気モード（NV）と冷房使用モード（AC）における窓開放の平均値と標準偏差を示す。窓開放の平均値は NV モードで 0.70、AC モードで 0.01 である（表 3）。イギリスのオフィスビルにおける研究でも NV モードで 0.70、AC モードの窓開放の平均は 0.04 で非常に低い⁶⁾。よって AC モードではほとんど窓開放されていないことから、本研究では NV モードのみを分析する。

表 3 窓開放の平均値と標準偏差

所在地	住宅番号	サンプル数	平均値	標準偏差
東京	A	34	0.71	0.46
	B	245	0.02	0.13
	C	155	0.79	0.41
横浜	D	78	0.83	0.38
	E	188	0.24	0.43
	F	397	1.00	0.05
	G	52	0.48	0.50
	H	186	0.10	0.30
	I	523	0.27	0.45
	J	145	0.32	0.47
三浦	K	74	0.47	0.50
All	NVモード	1,307	0.70	0.46
	ACモード	762	0.01	0.11

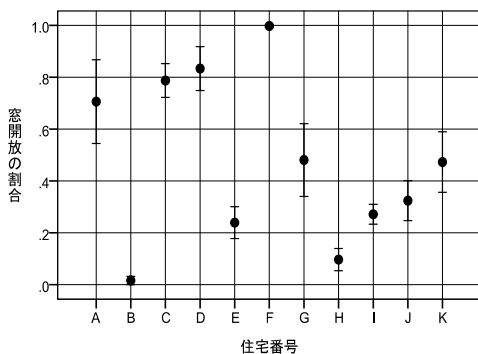


図 1 窓開閉調査時における全軒の室温分布

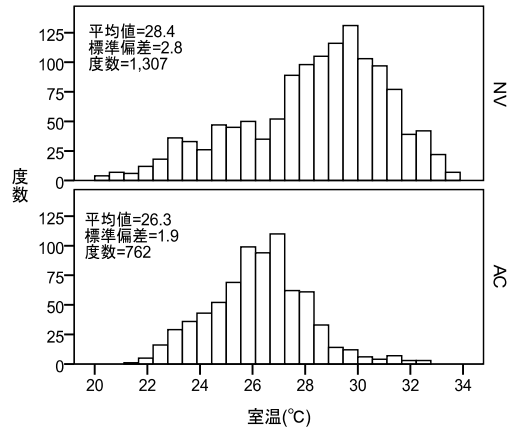


図 2 各世帯の窓開放の平均値と 95%信頼区間

4.2 窓開閉と気温の関係

窓開放に影響する要因として、気温と窓開閉の関係を分析する。表 4 に NV モードにおける窓開閉と室温や外気温の相関関係を示す。窓開閉と室温の相関係数は 0.42 であり、外気温との相関係数より高い。室温と外気温の相関係数は 0.83 と非常に高い相関関係で、室温は外気温に影響されている。国は違うがパキスタンの例でも、窓開閉と室温の相関関係は 0.43、外気温との相関関係は 0.41 で同じような結果となっている⁸⁾。居住者は室温・外気温の変化に伴い窓開閉を行っているといえる。

表 4 NV モードにおける窓開閉と気温の相関係数

項目	窓 : T_i	窓 : T_o	$T_i : T_o$
相関係数	0.42	0.37	0.83
サンプル数	1,307	1,306	1,306
有意確率	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$

T_i : 室温 (°C)、 T_o : 外気温 (°C)、 p : 有意水準

図 3 に室温と窓開放の割合を、図 4 に外気温と窓開放の割合を示す。室温や外気温のデータ数が偏らないようにランダムに 10 グループに分けて平均値を求めた。各グループのサンプル数は 73~128 である。平均室温が 26.4℃になると、窓開放の割合が 0.5 に達する（図 3）。一方、平均外気温が 24.3℃になると、窓開放の割合が 0.7 に達する（図 4）。室温や外気温が高くなるにつれて窓開放の割合は高くなるが、室温に比べて外気温の方が早く窓開放の割合が高くなっている。平均外気温と窓開放の割合は 24.3℃までは相関関係がよく出ているが、それ以降は窓開放の割合はあまり変化せずほぼ一定の数値となっている。一方、窓開放の割合と平均室温の関係は室温が上がると窓開放の割合が比例して上がっている。図 3 の相関関係と比較しても平均室温の方が窓開放の割合と関係している。また、平均室温が 24.6℃の時より 22.6℃の方が窓開

放の割合が高くなっているのは、窓開閉の必要性のない快適温度の範囲であったためと思われる。

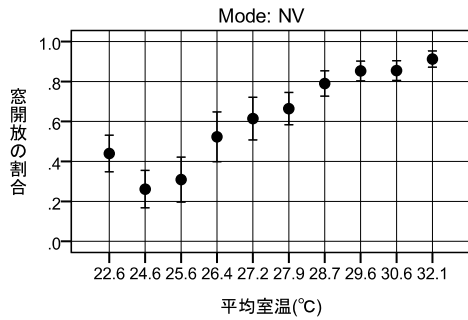


図3 室温と窓開放の平均値と95%信頼区間

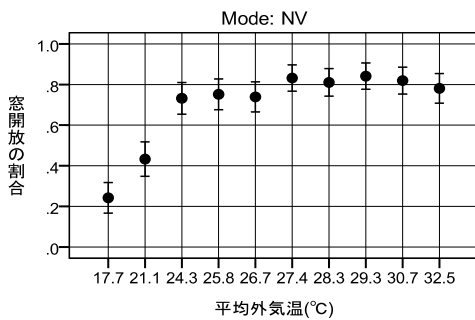


図4 外気温と窓開放の平均値と95%信頼区間

4.3. 窓開放の予測

気温と窓開放の割合の関係を予測するために、既往研究と同様に室温と外気温からロジスティック回帰分析を行う。図5にロジスティック回帰分析で得られた窓開閉と室温の関係、図6に窓開閉と外気温の関係を示す。各図のプロットは1°C刻みに平均した値であり、5以下のサンプル数は表示していない。窓開閉と室温や外気温の間で下記の式が得られた。

$$\text{logit}(p) = 0.353 T_i - 9.032 \quad (n=1307, R^2=0.165, p<0.001) \quad (3)$$

$$\text{logit}(p) = 0.20 T_o - 4.315 \quad (n=1306, R^2=0.131, p<0.001) \quad (4)$$

T_i :室温 (°C)、 T_o :外気温 (°C)、 n :サンプル数、 R^2 :Cox and Snell の決定係数、 p :有意水準である。窓開放の割合と室温の回帰係数は0.353、決定係数0.165となっており、外気温より大きい。これは居住者が外気温よりも室温に対して反応し、窓を開放していると予測している。パキスタンのオフィスの例でも窓開放の割合と室温の回帰係数は0.140、決定係数は0.19で外気温よりも室温の方が大きくなっている⁸⁾。京都市の路地では外気温のみが回帰係数は0.395、決定係数は0.38で屋外では高い数値だった⁹⁾。予測値と実測値を比べると比較的一致していたが、室温や外気温どちらとも20~25°Cにおいてはプロットが予測よりも少しくずれている傾向にある。窓開放と気温の

相関関係と同様に、おそらく本調査期間で窓開閉の必要性がなかった温度であり、気温以外の他の要素(空気を入れ替えたい、習慣的に開けている等)で関係しているためと思われる。窓開閉に関しては温熱環境以外にもこうした様々な理由が影響していると考えられる。本研究では物理的要因しか調査を行っていないため、今後は物理的要因についても調査する。

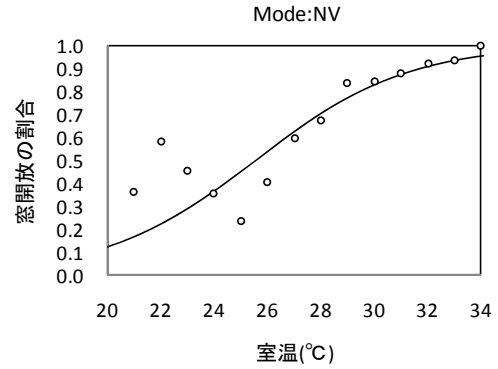


図5 窓開閉と室温の関係。

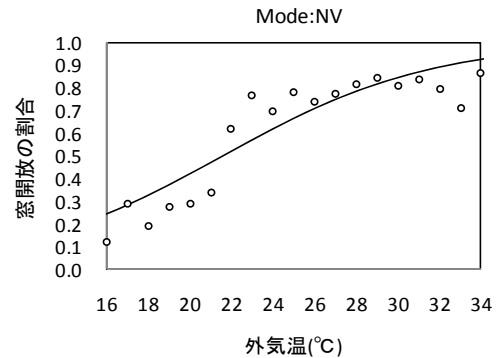


図6 窓開閉と外気温の関係

4.4. 窓と気流感の関係

窓開放と気流感の関係を明らかにするために、図7に窓開閉数と平均気流感の関係を示す。気流感申告は7段階尺度で行った(1.とても風が弱い、2.風が弱い、3.やや風が弱い、4.ちょうどよい、5.やや風が強い、6.風が強い、7.とても風が強い)。表5に窓開閉数によって平均気流感の平均値と標準偏差がどう変わるかを示す。窓開閉数が4以上の場合にはサンプル数が少ないが、0~3の場合を見ると窓リビングの窓が閉じている時の平均気流感は2.70と「3.やや風が弱い」より低い。一方窓数が3つ以上開いている時の平均気流感は3.75と「4.ちょうどよい」に限りなく近くなっており、両者の申告には差がある。窓開放数が増えることによって、風速が増加し風通しがよくなっていると思われる。窓開放数が多くなると、居住者が気流感をちょうど良いと感じており、窓開放数が快適性の実現に重要である。北インドとイラクでの室内の熱的

快適感調査は風によって最大4℃の温度現象に相当する結果が得られており、快適性に効果があった¹⁰⁾。また、川崎市の住宅でも朝方を除いて風速が大きいほど窓は開けられて冷房が使用されていない傾向があった¹¹⁾。窓開閉数は気流感を調整する効果が得られると考えられる。

表5 窓開閉数と平均気流感の平均値と標準偏差

窓開閉数	サンプル数	平均値	標準偏差
0	297	2.70	1.39
1	296	3.21	1.31
2	592	3.61	0.96
3	79	3.75	0.61
4	5	4.00	0.00
5	7	4.00	0.00

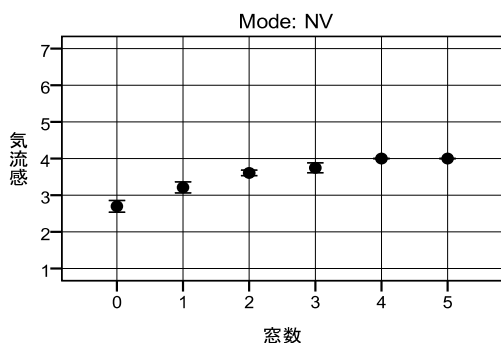


図7 各窓開閉数における平均気流感と95%信頼区間

5. まとめ

本研究では、関東地域の住宅を対象に夏と秋のリビングにおける温熱環境と居住者の窓開閉の調査を行い、下記の結果が得られた。

1. 窓開放の平均値はNVモードで0.70、ACモードで0.01であり、ACモードでは窓開放はほとんど行われていない。また、リビングに冷房のない住宅では窓開放率が平均0.84と高かった。
2. 窓開閉と室温の相関係数は0.42、外気温との相関関係は0.37であり、窓開閉と室温の相関関係の方が高かった。室温は外気温に影響されていることが明らかになった。
3. ロジスティック回帰分析では室温・外気温ともに高くなるにつれて、開放の割合も高くなっていった。窓開放の割合と室温の回帰係数は0.353、決定係数0.165となっており、外気温より大きくなった。
4. 窓開閉数が多くなるほど、居住者の気流感が「4.ちょうどよい」に近づいている。通風によって風速が増したためと思われる。一般的には屋外の風速は室内の風速よりも高いため、窓の開放によって室内の気流感及び温熱環境を調節するのに効果を期待できる。

謝辞

本研究において、実測調査と申告調査に居住者の方々に多大なご協力を頂いた。また、データ入力に同僚の梅田真衣、小澤真之、勝野二郎、酒井匠、重野悠、田屋博貴、西村美沙紀、室本真紀、吉村咲希と和田拓記にご協力して頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

1. 鈴木玉美、梅宮典子、吉田治典：夏季から秋季にかけての窓開閉行為の要因に関する研究、日本建築学会計画論文集、pp. 91-98、2010.6.
2. 梅宮典子、吉田治典：中間期を中心とする窓開閉面積率と室内外気温との係わりに関する研究、衛生工学論文集、pp.19-28、2004.1.
3. 金政秀、川口友真、田辺新一：執務者による自然換気窓の開閉行動に関する研究、日本建築学会環境系論文集、pp. 1075-1082、2009.9.
4. 菅原正則、小松田綾子、林基哉：戸建住宅における窓開閉行為時の内外気象条件、日本建築学会東北支部、pp. 99-102、2008. 6.
5. 久保田徹：ジョホールバル市の集合住宅団地における冷房の使用状況と窓の開閉状況に関する実態調査、日本建築学会環境系論文集、pp. 83-89、2007.6.
6. Rijal H.B., Tuohy P., Humphreys M.A., Nicol J.F., Samuel A., Clarke J.: Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings, Energy and Buildings 39, pp. 823-836, 2007.
7. Rijal H.B., Humphreys M.A., Nicol J.F.: Understanding occupant behavior the use of controls in mixed-mode office buildings, Building Research & Information 37(4), pp. 381-396, 2009.
8. Rijal H.B., Tuohy P., Humphreys M.A., Nicol J.F., Samuel A., Rijal I.A.: Development of Adaptive Algorithms for the Operation of Windows, Fans, and Door to Predict Thermal Comfort and Energy Use in Pakistani Buildings, ASHRAE Transaction, pp. 555-573, 2008.
9. 真嶋一博、梅宮典子、吉田治典、H. B. リジャール：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、pp. 41-48、2007.12.
10. Nicol J.F.: An analysis of some observations of thermal comfort in Rookeke, India and Baghdad, Iraq. Annals of Human Biology 1(4), pp. 411-426, 1974.
11. 浅輪貴史、梅干野晃、武澤秀幸、清水敬示：戸建住宅における窓開閉・冷房使用の行動特性と影響要因解析—屋外住宅の微気候と住居者の開放的な住まい方との関わりに関する研究 その2、日本建築学会環境系論文集、pp. 87-94、2005.7.

*1 東京都市大学環境情報学部 学部生

*2 東京都市大学環境情報学部 講師・博士（工学）