

夏と秋における住宅の快適温度に関する研究

4.環境工学-10.温熱感

準会員 ○ 吉村咲希^{*1}正会員 H.B.リジャル^{*2}住宅 リビング 温冷感
気温 快適温度 適応モデル

1. はじめに

住宅は生活の基本である「衣食住」の1つでもあり、その重要性は幅広く知られている。例えば、住環境同様に重要視されている衣類は消費者が状況に応じてそれぞれにとって最も快適な衣類を選んで着用している。このように消費者は「衣食住」に対して個人の好みに合った最も快適性の高いものを選ぶ傾向がみられる。特に利用頻度の高い住宅の快適は重要である。

快適温度は住宅の快適性を向上させるための重要な要素の1つであると考えられている。また、住宅の快適温度を調査することで、その温度を住宅の習慣温度とすれば夏場の過度な冷房の使用や設定温度を回避することができ、家計の経済的な負担を軽くすることができる。

これまで、住宅の快適温度について様々な研究が行われてきた。関西地方を対象とした研究¹⁾²⁾、国外の研究³⁾⁴⁾等がある。しかし、研究によっては、調査期間が短いものや、サンプル数が少ないものもある。国内の研究は関西地方を対象としたものが多く、関東地方ではあまりみられない。また、気温が時間帯によって異なるため、快適温度も時間帯によって異なると思われるが、それらを分析した研究がみられない。

本研究では、関東地方における夏と秋の一般住宅の温熱環境の実測と居住者の熱的主観申告調査を行い、居住者の快適温度について明らかにする。また、時間帯によって快適温度はどの程度異なるのかを検証する。

2. 調査方法

調査は東京都で3軒、神奈川で9軒の11世帯で行った(表1)。調査期間は7~10月である。温熱環境の測定は小型温湿度計を用いて10分間隔で測定した。測定高さはリビングの床上約110cmである。また、温冷感申告は7段階ASHRAE尺度を用いて行った(表2)。29人の居住者から集めた申告数は2,109個である。申告した居住者の概要及び、申告時のclo値について表3に示す。clo値は既存の研究⁷⁾⁸⁾を参考に算出した。

表1. 住宅概要

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

表2 温冷感申告と尺度

今、気温をどのように感じていますか？	
尺度	項目
1	寒い
2	涼しい
3	やや涼しい
4	どちらでもない
5	やや暖かい
6	暖かい
7	暑い

表3. 申告した居住者概要

性	項目	平均値	SD
女(14名)	年齢(歳)	42	13.6
	身長(cm)	158	4.2
	体重(kg)	52	7.5
	体表面積(cm ²)	1.5	0.10
	Clo値 (n=1287)	0.3	0.11
男(15名)	年齢(歳)	29	14.8
	身長(cm)	168	4.9
	体重(kg)	57	5.7
	体表面積(cm ²)	1.6	0.07
	Clo値 (n=809)	0.2	0.13

n: サンプル数、SD: 標準偏差

3. 分析方法

3.1 快適温度の算出法

快適温度は回帰方法とGriffiths法を用いて計算する。回帰法とは室温と温冷感申告の一次回帰から、「4. どちらでもない」に相当する温度を求めて快適温度とする方法である。フィールド調査では回帰法による快適温度の算出が上手く行かない場合もあるため、下記の式を用いてGriffiths法でも快適温度を検証する³⁾⁴⁾⁹⁾。

$$T_c = T_i + (4 - C) / a^* \quad (1)$$

T_c : Griffiths法による快適温度(°C)、 T_i : 室温(°C)
 C : 温冷感申告、 a^* : 回帰係数である。 a^* は0.5と仮定する。

3.2 移動平均外気温の算出法

移動平均外気温(°C)は日平均外気温を指数的に重みづけした温度であり、次式で表わされる⁸⁾。

$$T_{m} = (1-\alpha) \cdot \{T_{od-1} + \alpha \cdot T_{od-2} + \alpha^2 T_{od-3} \dots\} \quad (2)$$

T_{od-1} は前日の日平均外気温(°C)、 T_{od-2} は前々日の日平均外気温(°C)で、以下同様である。 α は0と1の間の定数であり、移動平均外気温に対する反応速度であり、本研究では0.8と仮定した。

4. 結果と考察

4.1 温冷感申告・温熱環境

表4に各邸の温冷感申告と温熱環境の差異を示すため温冷感申告と平均室温の概要を示す。図1と図2に温冷感と室温の分布を示す。今年の夏は猛暑であったが、NVモード(自然換気時)とACモード(冷房使用時)の温冷感申告をみると、「4.どちらでもない」NVモードで42%、ACモードで43.7%と最も多いが(図1)、その割合が住宅によってかなり異なっている(表4)。申告中の平均室温はNVモードで28.6°C、ACモードで26.3°Cであり、両方ともほぼ正規分布になっている(図2)。

表4 各邸の温冷感と室温の関係

所在地	邸	冷房	温冷感 (-)			T_i (°C)		T_{in} (°C)	
			平均	SD	割合(%)	平均	SD	平均	SD
東京	A	無	4.8	1.8	5.9	29.6	3.0	27.6	0.2
	B	有	3.3	1.0	35.4	24.2	1.2	24.3	1.4
	C	有	4.1	1.6	25.8	27.3	2.8	27.0	2.5
横浜	D	無	6.1	1.5	7.7	29.3	2.6	26.4	2.2
	E	有	3.9	1.3	31.4	27.3	2.5	27.0	2.1
	F	無	4.3	.6	66.5	29.8	1.6	29.5	1.4
	G	有	4.4	1.6	23.1	29.6	2.5	29.7	2.4
	H	有	4.0	.8	58.6	27.3	1.5	27.0	1.3
	I	有	4.6	1.4	46.3	27.1	2.4	26.1	1.3
三浦	J	有	4.2	1.2	35.9	27.8	2.7	27.5	2.9
	K	有	4.1	1.7	9.5	28.2	2.3	28.0	1.8
	平均		4.3	1.3	31.4	27.9	2.3	27.3	1.8

割合: 「どちらでもない」を申告した割合、SD:標準偏差、 T_i :申告中の平均室温(°C)、 T_{in} :温冷感申告「どちらでもない」時の平均室温(°C)

4.2 回帰法による快適温度

回帰法による快適温度を分析するために、温冷感と室温の相関関係を分析する。図3にNVとACモードの温冷感と室温の散布図を示す。なお、冷房モードには除湿モードのデータの含めた(n=112)。図中に一次回帰線と95%信頼区間の線を示す。温冷感申告(C)と室温(T_i , °C)の間に下記の1次回帰式が得られた。

$$NV \quad C = 0.257 T_i - 2.726 \quad (n=1,306, r=0.54, p<0.001) \quad (3)$$

$$AC \quad C = 0.161 T_i - 0.539 \quad (n=762, r=0.28, p<0.001) \quad (4)$$

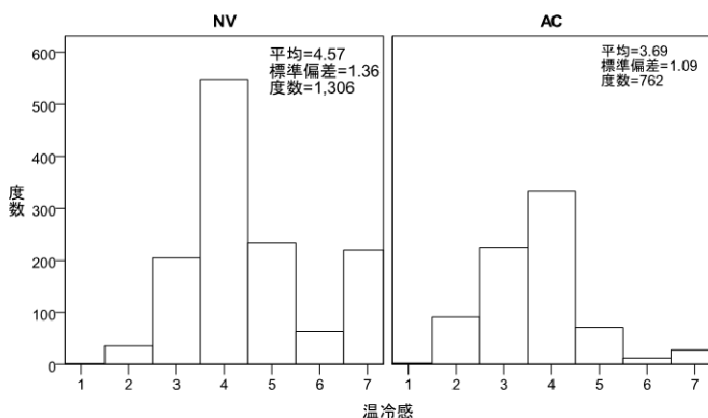


図1. 温冷感の分布

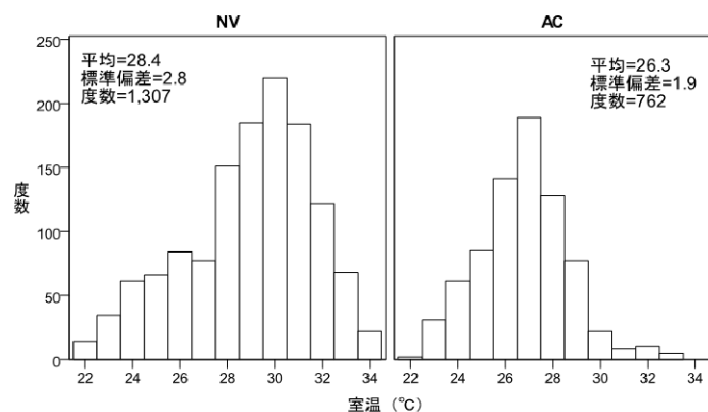


図2. 申告中の室温の分布

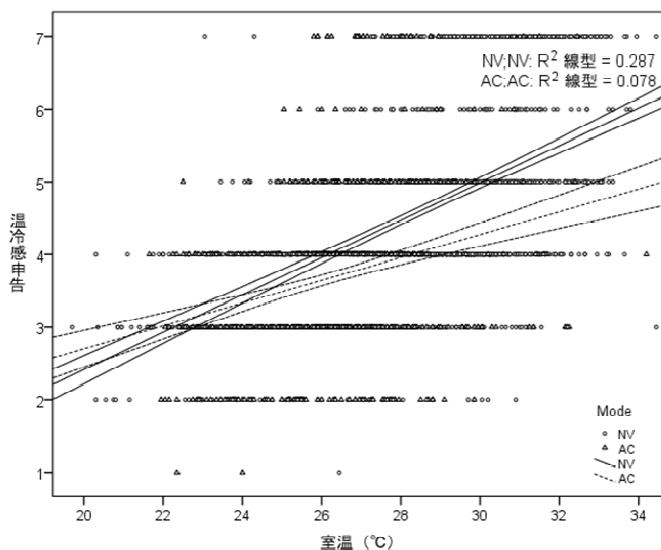


図3. NVとACモードの温冷感と室温の関係

NVモードの回帰係数も相関係数もACモードより高い。表5に本研究と既往研究の快適温度の比較を示す。

NVモードの回帰係数を既往研究と比較すると、パキスタンの回帰係数と近い事を表5に示す。(3)(4)の式を用いて、温冷感「4. どちらでもない」時の快適温度を予測すると、NVモードで26.2℃、ACモードで28.2℃となる。自然換気モードの快適温度は冷房モードより2℃低い。これは居住者が冷房によって涼しく感じたためと思われる。また、温冷感「3. やや涼しい」、「5. やや暖かい」を用いて、NVモードの快適範囲を計算すると、22.3～30.1℃であり、妥当な値であると思われる。

表5に本研究と既往研究の比較を示す。本研究のNVモードと比較したのは、既往研究の多くの快適温度もNVモードのデータであると考えたためである。既往の快適温度は21～30℃に変動しており、本研究と類似している。地域によって、快適温度に差がみられるが、関東と関西では大きな差はみられない。

表5. 本研究と既往研究の比較

調査場所	参考文献	回帰式	快適温度(℃)	調査時期
関東	本研究(NV)	$C = 0.257T_i - 2.726$	26.2	夏と秋
関西	1	$C_m = 0.63T_{om} - 13.45$	27.6	夏
ネパール	3	$C = 0.0576T_g - 1.2669$	21～30	夏
パキスタン	4, 5	$C = 0.19T_g - 0.59$	26.7～29.9	夏
イギリス	6	-	22.9	夏

C: 温冷感、 C_m : 平均温冷感申告、 T_i : 室温(℃)、 T_{om} : 平均室内作用温度(℃)、 T_g : グローブ温度(℃)

4.3 時刻別の快適温度

時間帯別の快適温度を比較するために、NVとACモードの全てのデータをランダムに4つの時間帯に分類した。表6と表7に得られた回帰式と快適温度を示す。ほとんどの時間帯でNVモードの回帰係数や相関係数はACモードより高い。NVモードの時間帯別の快適温度に多少の差はみられ、朝や夜の快適温度は昼や夕より高い。同様な傾向がACモードでもみられる。ACモードの快適温度はNVモードより高い。Griffiths法を用いた場合ではNVモードは回帰法を用いた場合よりも高く、ACは回帰法を用いた場合の方が低い。

表6. NVとACモードの時間帯別の快適温度

モード	時間帯	式	n	r	p	T_c	T_{eg}
NV	4:31	$C = 0.164T_i - 0.392$	323	0.33	<0.001	26.8	27.4
	10:00	$C = 0.276T_i - 2.904$	325	0.59	<0.001	25.0	26.7
	15:19	$C = 0.261T_i - 2.677$	323	0.53	<0.001	25.6	27.3
	22:00	$C = 0.182T_i - 0.959$	335	0.45	<0.001	27.2	27.4
AC	3:37	$C = 0.124T_i + 0.413$	156	0.20	<0.001	28.9	27.4
	13:24	$C = 0.141T_i + 0.070$	225	0.27	<0.001	27.9	26.6
	20:53	$C = 0.170T_i - 0.749$	192	0.24	<0.001	27.9	27.0
	23:15	$C = 0.183T_i - 1.221$	189	0.36	<0.001	28.5	26.7

n: サンプル数、r: 相関係数、p: 有意水準、 T_c : 快適温度(℃)、 T_{eg} : Griffiths法による快適温度(℃) C: 温冷感申告、 T_i : 室温(℃)

4.4 Griffiths法による快適温度

Griffiths法(式1)を用いてNVとACモードの快適温度をさらに検証する。図4に各温冷感申告と室温から計算したGriffiths法による快適温度の分布を示す。平均快適温度は、NVモードで27.2℃、ACモードで26.9℃であり、両者の差が0.3℃である。回帰法とGriffiths法による快適温度を比較すると、NVモードではGriffiths法の方が1℃高いが、ACモードでは回帰法の方が1℃高い。この差はGriffiths法では回帰係数を0.5と仮定したためである。

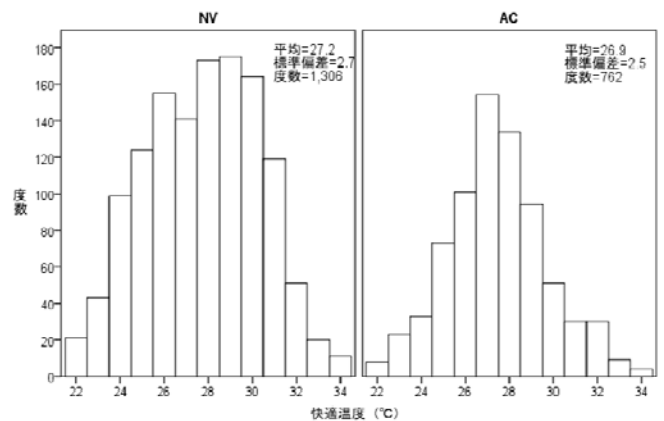


図4. Griffiths法による快適温度の分布

4.5 適応モデル(adaptive Model)の提案

適応モデルは外気温を用いて室内快適温度を予測するモデルである¹¹⁾。本研究でもリビングの適応モデルを提案する。適応モデルを提案するために、図5にGriffiths法で計算した快適温度(T_c , °C)と移動平均外気温度(T_{rm} , °C)の関係を示す。図中に一回帰の線と95%信頼区間の線を示す。主に夏の調査であるため、 $T_{rm} < 25$ °Cのデータ数が少ない。図の快適温度は各申告と室温から予測した値であるため、大きなばらつきがみられる。しかし、このようなばらつきはCEN基準¹²⁾の元のデータにもみられる¹³⁾。得られた回帰式を下記に示す。

$$NV T_c = 0.415T_{rm} + 16.189 (n=1,306, r=0.43, p<0.001) \quad (5)$$

$$AC T_c = 0.155T_{rm} + 22.560 (n=762, r=0.10, p=0.004) \quad (6)$$

NVモードの回帰係数も相関係数もACモードより高い。CEN基準¹²⁾の回帰係数はNVモードで0.33、ACモードで0.09であり、本研究の方が両者とも高い。移動平均外気温度を28℃と仮定すると、快適温度はNVモードで27.8℃、ACモードで26.9℃となる。このように、外気温度が分かれば、室内快適温度を予測する事が出来る。

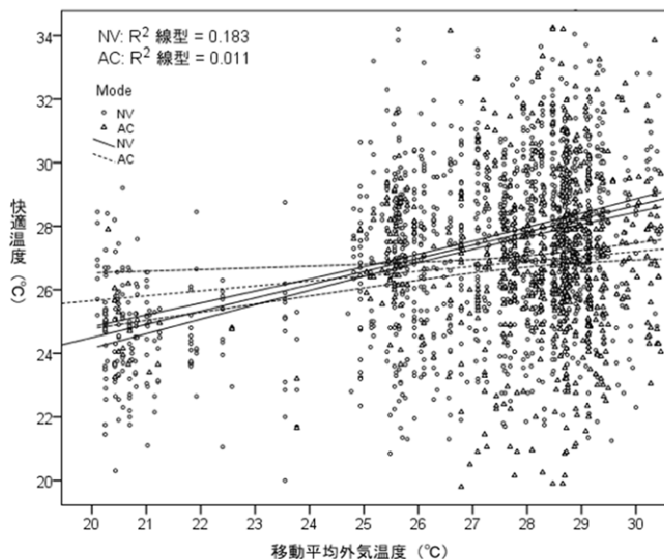


図 5. 快適温度と移動平均外気温度の関係

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の温熱環境の実測と居住者の熱的主観申告調査を行い、下記の結果が得られた。

1. 自然換気モード (NV) の快適温度は回帰法で 26.2°C、Griffiths 法で 27.2°C である。また、冷房モード (AC) の快適温度は回帰法で 28.2°C、Griffiths 法で 6.9°C である。回帰法と Griffiths 法による快適温度の結果が類似しているが、NV モードと AC モードでは快適温度に差がみられた。
2. NV モードと AC モードの時間帯別の快適温度に多少の差がみられ、朝や夜の快適温度は昼や夕より高い。
3. 本研究で得られた快適温度は既往研究の範囲内に収まっている。
4. 快適温度と外気温に相関関係があり、提案した適応モデルを用いて室内快適温度を予測できる。

謝辞

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、細川陽平、室本真紀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. 中谷岳史、松原斎樹、藏澄美仁：関西地域の住宅における熱的快適性に関する実態調査-夏季の中立温度と許容範囲-：日本建築学会環境系論文集 第 597 号、pp.51-56、2005.11
2. 飛田国人、松原斎樹、藏澄美仁、中谷岳史、島田理

良：住宅の冬季実態調査における温冷感申告の評価尺度による差異、日本建築学会環境系論文集、第 646 号、pp.1291-1297、2009.12

3. Rijal H.B., Yoshida H., Umemiya N. (2010), Seasonal and regional, differences in neutral temperatures in Nepalese traditional vernacular, houses, *Building and Environment* 45(12), pp. 2743-2753
4. Nicol F, Jamy GN, Sykes O, Humphreys M, Roaf S, Hancock M.: A survey of thermal comfort in Pakistan toward new indoor temperature standards. Oxford Brookes University, School of Architecture; 1994.
5. Nicol. F, Roaf. S, Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan project, *Energy and Buildings* 23 (1996) 169-174
6. Rijal H.B. and Stevenson F. (2010), Thermal comfort in UK housing to avoid overheating: lessons from a 'Zero Carbon' case study, Proceedings of Conference: Adapting to change: New thinking on comfort, Windsor, UK, 9-11 April 2010. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings.
7. 社団法人 空気調和・衛生工学会：快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間をめざして、pp.83-117, 1997.12
8. ISO (2003), Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble, international Organization for Standardization, Switzerland
9. Griffiths ID. 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.
10. リジャル H.B, 梅宮典子訳：建物における熱的快適性の適応的基準 (Nicol F.), 空気調和・衛生工学会 第 83 巻 第 6 号, pp. 421-427, 2009.6
11. Humphreys M.A. (1978), Outdoor temperatures and comfort indoors, *Building Research and Practice (J. CIB)* 6(2), pp. 92-105.
12. Comite' Europe'en de Normalisation (CEN) (2007) EN 15251: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, CEN, Brussels.
13. Nicol F, Humphreys M (2007), Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort, *Solar Energy* 81 (3), pp 295-304

*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)