

住宅における快適温度と適応モデルに関する研究

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} 菊池世欧啓^{*3}

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

近年では猛暑が続き、熱中症による死傷者が発生したというニュースを耳にする機会が増えている。室内の温熱環境を向上させることは、快適性を追求するのみでなく生命にかかわる要素として改善の必要が求められていると言える。

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⁾⁶⁾等がある。しかし、国内の研究は関西地方や岐阜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。

本研究では、関東地方における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。特に時間帯による快適温度の変化、自然換気と冷房使用時の快適温度の差について考察する。また、日本の一般住宅に対してあまり提案されてこなかった適応モデルを提案する。

2. 調査方法

長期的調査と短期的調査を行い、6,000以上の申告を得られた(表1)。調査は7段階ASHRAE尺度(表2)を用いた。申告調査と対象住居の室温・相対湿度は小型温湿度計を用いて10分間隔で測定を行った。

表2 ASHRAE 尺度

今、気温をどのように感じていますか?	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1 調査概要

調査	調査期間	調査対象	申告数	申告者数
長期的調査	2010年7月～2011年7月	東京都・横浜市・三浦市の住宅のリビング(11軒)	3,302	29
短期的調査	2011年8月5日～18日 2011年8月24日～9月6日	東京都・神奈川県・千葉県・埼玉県の住宅のリビング(59軒)	2,879	109

3. 分析方法

(a)快適温度の予測

回帰法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。Griffiths法とは下記の式を用いて快適温度を検証する方法である⁷⁾。

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

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

(b)移動平均外気温度の算出

移動平均外気温度(T_{rm})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⁾。

$$T_{rm} = \alpha T_{rm-1} + (1-\alpha)T_{od-1} \quad (2)$$

T_{od-1} は前日の日平均外気温(℃)、 T_{rm-1} は前日の移動平均外気温度(℃)である。初日の T_{rm} は外気温と同じ数値で仮定した。 α は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。

3. 温熱環境の調査と快適温度の予測

3.1 申告中の温熱環境と温冷感申告

申告中に室内を自然換気していた場合はNVモード、冷房使用時はACモード、暖房使用時はHTモードとして区別して検討した。申告中の室内の温熱環境の実態を把握するため、それぞれの調査の申告中の室温と平均温冷感を表3に示す。

申告中の平均室温を夏の長期的調査と短期的調査と比較すると、短期的調査の方が0.3℃高かったがほぼ同じ室温となっている。ACモードの室温が短期的調査で高くなっているのは2011年の節電の影響であると考えられる。長期的調査の室温は夏29.0℃と冬18.6℃であり、10.4℃の季節差がある。

温冷感は冬のNVモード以外は「3. やや涼しい」から「5. やや暖かい」の範囲に収まっていることから、居住者は概ね快適に過ごしていると言える。

表3 各調査における申告中の室温と温冷感

調査	Mode	季節	室温(℃)		温冷感		温冷感4の室温(℃)	
			度数	平均	度数	平均	度数	平均
長期的調査	NV	夏	989	29.0	1,001	4.9	387	28.4
		秋	774	24.8	774	3.8	341	25.1
		冬	95	18.6	95	2.4	87	21.7
		春	135	21.5	138	3.7	19	18.6
	AC	夏	601	26.4	601	3.7	245	26.4
		秋	161	26.0	161	3.8	88	26.1
		冬	62	19.8	62	4.0	6	20.2
		春	284	17.3	295	3.1	62	19.1
	HT	夏	122	18.7	174	4.1	17	19.7
		NV	1,993	26.3	2,008	4.3	834	26.1
		AC	762	26.3	732	3.7	333	26.3
		HT	468	18.0	531	3.5	85	19.3
短期的調査	NV	夏	1,603	29.3	1,648	4.8	414	28.5
	AC		1,093	27.9	1,171	3.9	493	27.8

3.2 快適温度の予測

(a) 回帰法による快適温度の予測

回帰法による快適温度を分析するために、温冷感と室温の回帰分析を行う。各調査の温冷感申告と室温の関係を図1に、回帰分析から得られた回帰式と快適温度を表4に示す。

夏のNVモードの快適温度は長期的調査で25.2℃、短期的調査で27.1℃であり、短期的調査の方が1.9℃高い。夏のACモードは長期的調査で28.2℃、短期的調査で28.2℃であり、同様の結果が得られた。NV・ACモードの快適温度を比較するとNVモードは25.2℃、ACモードは28.3℃であり、両者の差は3.1℃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うまくいかない場合もあり、回帰係数のp値が大きい式もあるため、Griffiths法を用いて快適温度を検討する。

(b) Griffiths法による快適温度の予測

Griffiths法を用いて両調査の快適温度をさらに検証する。各温冷感申告と室温から計算したGriffiths法による快適温度を表4に示す。

Griffiths法による長期的調査と短期的調査の夏の快適温度を比較すると、長期的調査のNVモードは29.0℃、短期的調査は27.6℃であり、長期的調査の方が1.4℃高い。ACモードでは長期的調査が26.4℃、短期的調査が28.1℃であり、短期的調査の方が1.7℃高かった。NVモードの夏の快適温度は29.0℃、冬は18.6℃であり、10.4℃の季節差がある。モード別に比較すると、NVモードが18.6～29.0℃、ACモードが26.0～28.1℃、HTモードが17.3～19.8℃であり、NVモードが最も幅が大きい。

Griffiths法の回帰係数を0.5と仮定したため回帰法の快適温度と差がみられる(表4)。回帰法とGriffiths法の快適温度の差が最も大きいのは3.8K(NVモード)である。

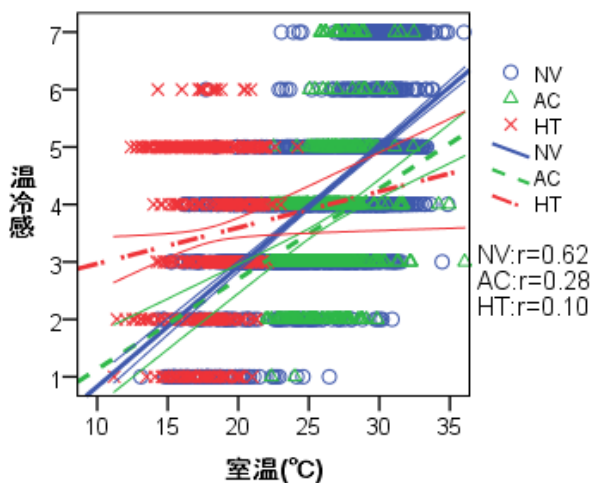


図1 長期的調査の温冷感と室温の関係

表4 回帰式と快適温度

調査	Mode	季節	回帰法				Griffiths法			T_{eq} (K)
			回帰式	n	r	p	T_e (℃)	T_{eq} (℃)	SD(℃)	
長期的調査	NV	夏	$C=0.228T_i-1.739$	989	0.41	<0.001	25.2	29.0	2.4	3.8
		秋	$C=0.169T_i-0.419$	774	0.58	<0.001	26.1	24.8	3.7	1.3
		冬	$C=0.193T_i-1.187$	95	0.29	<0.001	26.9	18.6	2.0	8.3
		春	$C=0.281T_i-2.373$	135	0.55	<0.001	22.7	21.5	2.1	1.2
	AC	夏	$C=0.173T_i-0.878$	601	0.3	<0.001	28.2	26.4	2.0	1.8
		秋	$C=0.086T_i+1.542$	161	0.17	0.03	28.6	26.0	1.7	2.6
	HT	秋	$C=0.099T_i+2.012$	62	0.12	0.341	-	19.8	1.4	-
		冬	$C=0.022T_i+3.475$	284	0.03	0.608	-	17.3	2.2	-
	NV	春	$C=0.014T_i+4.343$	122	0.04	0.663	-	18.7	2.3	-
		夏	$C=0.209T_i-1.257$	1,993	0.62	<0.001	25.2	25.9	3.3	0.7
短期的調査	AC	秋	$C=0.157T_i-0.439$	762	0.28	<0.001	28.3	27.0	2.5	1.3
		冬	$C=0.063T_i+2.339$	468	0.102	0.027	26.4	19.0	3.5	7.4
	NV	秋	$C=0.403T_i-6.937$	1,603	0.55	<0.001	27.1	27.6	2.3	0.5
		冬	$C=0.273T_i-3.705$	1,093	0.31	<0.001	28.2	28.1	2.3	0.1

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

3.3 既往研究との比較

これまで各地で行われてきた快適温度と本研究から得たGriffiths法によるNVモードの快適温度を比較する。既往研究の夏の快適温度は21.1～30.0℃であり、本研究の29.0℃、27.6℃共に既往研究の範囲内にある(表5)。既往研究の冬の快適温度は9.9～25.1℃であり、長期的調査の18.6℃は範囲内にある。

表5 既往研究と本研究の快適温度の比較

調査場所	快適温度(℃)	
	夏	冬
関東(長期的調査:NV)	29.0	18.6
関東(短期的調査:NV)	27.6	-
関西 ¹⁾	27.7	9.9
ネパール ³⁾	21.1～30.0	13.4～24.2
パキスタン ⁵⁾	26.7～29.9	19.8～25.1
イギリス ⁶⁾	22.9	19.4

3.4 時間帯別快適温度

時間帯別の快適温度を比較するために、長期的調査と短期的調査の全てのNV・AC・HTモードのデータをランダムに4つの時間帯に分割した。表6に得られた回帰式と快適温度を示す。朝や晩の快適温度は昼や夕方より高いという結果となっている。これは、昼や夕方は朝や晩に比べて活動量が多く、より行動しやすい快適な作業環境を求めているのではないかとと思われる。

表6 時間帯別快適温度と回帰式

調査	Mode	時間帯	回帰式	n	r	p	快適温度(℃)
長期的調査	NV	朝	$C=0.141T_i+0.464$	508	0.42	0.001	25.1
		昼	$C=0.252T_i-2.224$	496	0.73	0.001	24.7
		夕	$C=0.225T_i-1.552$	508	0.66	0.001	24.7
		晩	$C=0.127T_i+0.589$	497	0.45	0.001	26.9
短期的調査	NV	朝	$C=0.480T_i-9.152$	424	0.59	0.001	27.4
		昼	$C=0.389T_i-6.427$	396	0.50	0.001	26.8
		夕	$C=0.346T_i-5.224$	404	0.53	0.001	26.7
		晩	$C=0.404T_i-7.056$	424	0.47	0.001	27.4

n: サンプル数、r: 相関係数、p: 有意水準、C: 温冷感申告、 T_i : 室温(℃)

3.5 NV・AC・HTモードの快適温度の差

快適温度をモード別に比較すると、多くの場合回帰法でもGriffiths法でも、NVモードよりもACモードの方

が快適温度が高くなっている。これは使用した温冷感尺度と過度の冷房の使用によるものであると考えられる。今回の調査では温冷感尺度は「4 どちらでもない」「3 やや涼しい」を使用しているが、夏の暑い日に冷房をつけて申告をした場合、「やや涼しい」環境を快適として申告している可能性がある。また、冷房の利いた室内に長時間いた場合など冷房の影響で寒く感じるがあったのではないと思われる。実際の温冷感申告をみると、冷房を使用しなくてはならないような暑い環境であるのに関わらず、寒い側の申告が多くみられたため、AC モードの快適温度の方が高いと思われる。

4. 適応モデルの提案

4.1 適応モデルの提案

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⁹⁾。図 2 に Griffiths 法による快適温度 (T_c , °C) と移動平均外気温 (T_m , °C) の相関分析を示す。表 7 に Griffiths 法による快適温度と移動平均外気温の関係から得られた回帰式を示す。

NV モードに 25°C を移動平均外気温として表 7 の式に代入し、室内快適温度を予測すると 21.4°C となる。CEN 基準¹⁰⁾の回帰係数は NV モードで 0.33 であり、本研究の回帰係数 0.388 と類似している。しかし、CEN 基準はオフィスビルの調査に基づいているため、直接の比較はできないので、今後さらに検討する必要がある。

図 3 に長期的調査における Griffiths 法による快適温度と移動平均外気温の関係を示す。図中の 6 本の直線は適応基準 (CEN 基準) の許容範囲である。今回の快適温度は概ね許容範囲の中に入っており、居住者が広範囲で快適に感じている。

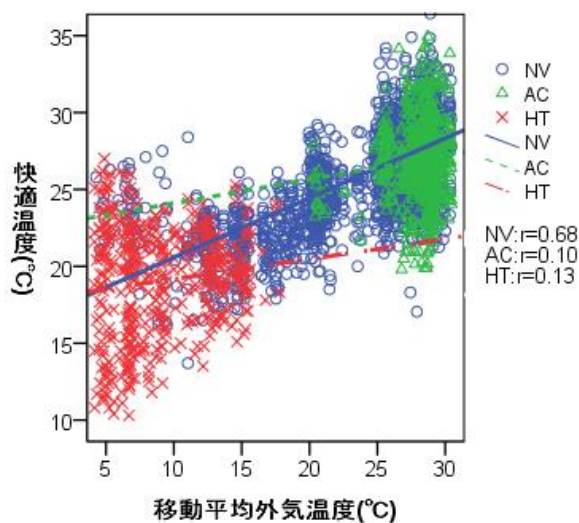


図 2 長期的調査の快適温度と T_m の関係

表 7 快適温度と移動平均外気温の関係

調査	季節	Mode	回帰式	n	r	p
長期的調査	夏	NV	$T_c = 0.511T_m + 13.387$	989	0.41	<0.001
		AC	$T_c = -0.028T_m + 27.813$	601	0.01	0.772
		HT	$T_c = 0.388T_m + 16.693$	1992	0.68	<0.001
	All	NV	$T_c = 0.388T_m + 16.693$	1992	0.68	<0.001
		AC	$T_c = 0.155T_m + 22.560$	762	0.10	0.004
		HT	$T_c = 0.130T_m + 17.873$	468	0.13	0.005
短期的調査	夏	NV	$T_c = 0.101T_m + 24.889$	1603	0.06	0.027
		AC	$T_c = 0.186T_m + 23.062$	1093	0.11	<0.001

n: サンプル数, r: 相関関係, p: 有意水準, c: 温冷感申告, T_c : 快適温度(°C), T_m : 移動平均外気温(°C)

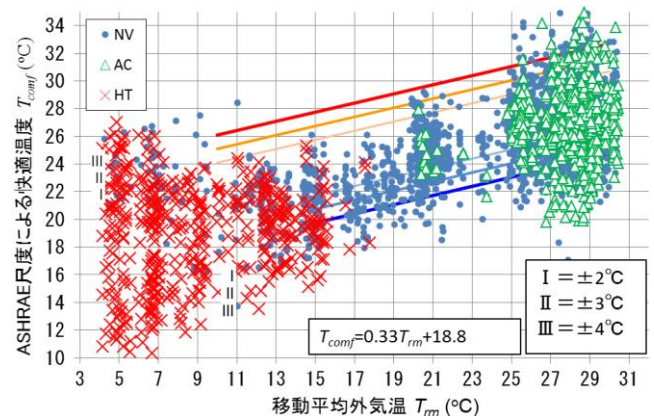


図 3 長期的調査における快適温度と T_m の関係

4.2 居住者の適応能力の考察

この節では住環境の適応として挙げられる行動的適応、生理的適応、心理的適応と実際の適応について、短期的調査のデータを用いて考察する。

まず、行動的適応について考察する。気温と窓開放、気温と扇風機の割合の関係を予測するために、既往研究¹³⁾と同様に室温からロジスティック回帰分析を行い(図 4、図 5)、図中の式が得られた。

図 4 と図 5 をみると窓開放の割合と室温の関係はほぼ横ばいに対して、扇風機使用の割合と室温の関係は室温が上がるにつれ扇風機の使用率は上がっている。居住者は NV モードにおいて窓開放より扇風機を使用して行動的適応を行っているといえる。

また、オフィスや冠婚葬祭などの場面は除くが、人は着衣でも自由に選択することができる。AC モードでは冷房を使用し、機械的に快適な環境に身を置いているため、室温と着衣量に相関関係はみられないが、NV モードにおいては相関関係がみられるため、室温が高いほど Clo 値を少なくするといった行動的な適応がみられる(表 8)。

次に生理的適応について考察する。発汗とは、人が暑さに適応しようとしている証拠である。人は汗をかくことにより気化熱で皮膚表面の熱を奪い、涼しく感じる。実際に短期的調査では、NV モードの方が AC モードよりも室温と発汗の相関関係は高く、生理的な適応がみられる(図 6)。

最後に心理的適応について考察する。実際に居住者が不快と感じた時、どのような行動をとりたいのか、室温

と行動の相関関係を分析する(表 9)。冷たいものを食べる・飲む、扇風機を使う、涼しい場所に移動すると室温の相関関係が高く、居住者は室温が高いほど環境調整行動を行って快適に感じたいという心理的な適応がみられる。さらに AC、NV モードにおける実際の室温と想像室温の差をヒストグラムで示す(図 8)。平均値は NV モードで 0.8℃、AC モードで 0.4℃であり、両モードとも実際の室温よりも想像室温を低く予測しているため、居住者が実際に高い温度で暮らしていることとなり、その分だけ居住者が高い温度に適応することになる。すなわち、居住者が低い温度と思い込むことによって心理的に高い温度に適応していると推測できる。次に実際の室温と冷房の設定温度の差をヒストグラムで示す(図 8)。設定温度よりも実際の室温は約 1℃高い。居住者は室温が設定温度になっていると思い込んでいる可能性があり、心理的に約 1℃高い室温に適応している可能性がある。

このように様々な適応が積み重なることによって、居住者が高い温度に適応していると思われる。地球温暖化や都市温暖化が問題になっている中で、居住者の適応は熱的快適性を実現する上で重要であるのみではなく、エネルギー削減や環境負荷低減にも役立つと思われる。

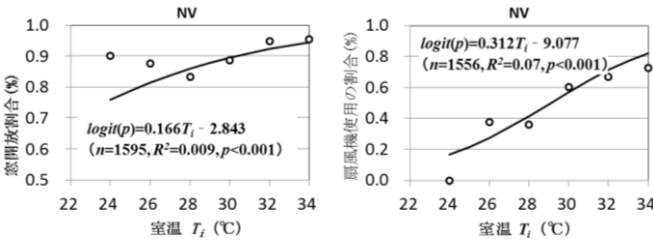


図 4 窓開放と室温の関係

表 8 Clo 値と室温(T_i)の相関関係

Mode	項目	Clo値: T_i
NV	r	-0.179
	p	<0.001
	n	1602
AC	r	-0.04
	p	0.182
	n	1093

r: 相関係数、p: 優位水準、n: サンプル数、 T_i : 室温 (℃)

図 5 扇風機と室温の関係

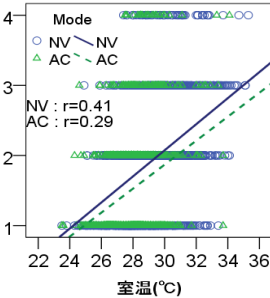


図 6 発汗と室温の関係

表 9 不快な場合に行いたい行動と室温(T_i)の相関関係

Mode	項目	冷たいものを食べる・飲む: T_i	シャワーを浴びる: T_i	手・顔・足を水で洗う: T_i	扇風機を使う: T_i	涼しい場所に移動する: T_i
NV	r	0.22	0.17	0.14	0.18	0.18
	p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	n	917	896	896	897	886
AC	r	0.19	0.22	0.14	0.34	0.21
	p	0.004	0.001	0.036	<0.001	0.002
	n	228	225	223	223	221

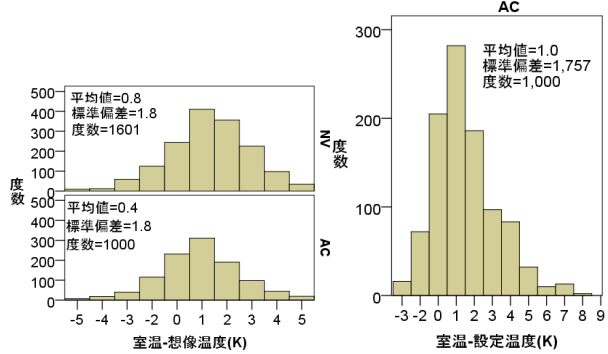


図 7 T_i と想像室温の差

図 8 T_i と冷房の設定温度の差

5. まとめ

- 1) 年間を通じて自然換気時の快適温度は回帰法で 25.2℃、Griffiths 法で 25.9℃である。冷房使用時は回帰法で 28.3℃、Griffiths 法で 27.0℃である。暖房使用時は Griffiths 法で 19.0℃である。快適温度には季節差があり、自然換気と冷暖房モードで快適温度に差がみられる。本研究で得られた快適温度は既往研究の範囲内にある。
- 2) 時間帯によって快適温度に差がみられ、朝や晩の快適温度は昼や夜より高い。これは活動量に関係していると思われる。
- 3) 快適温度と外気温には相関関係があり、適応モデルを用いて室内快適温度を予測出来る。
- 4) 行動的適応、生理的適応、心理的適応によって、居住者は高い温度に適応している。

参考文献

- 1) 中谷ら: 日本建築学会環境系論文集 第 597 号, pp.51-56, 2005.11
- 2) 飛田ら: 日本建築学会環境系論文集 第 646 号, pp.1291-1297, 2009.12
- 3) Rijal et al(2010), *Building and Environment* 45(12), pp. 2743-2753
- 4) Nicol et al.: A survey of thermal comfort in Pakistan toward new indoor temperature standards. Oxford Brookes University, School of Architecture; 1994.
- 5) Nicol. & Roaf. : *Energy and Buildings* 23 (1996) 169-174
- 6) Rijal & Stevenson (2010) : 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) 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.
- 8) リジャル, 梅宮: 空気調和・衛生工学会 第 83 巻 第 6 号, pp. 421-427, 2009.6
- 9) Humphreys (1978) : *Building Research and Practice* (J. CIB) 6(2), pp. 92-105.
- 10) Comite' Europe'en de Normalisation (CEN) (2007) EN 15251: Thermal Environment, Lighting and Acoustics, CEN, Brussels.
- 11) 吉村&リジャル: 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), D-2, pp. 27-28, 2011.8.
- 12) 勝野ら: 第 8 回神奈川産学チャレンジプログラム 川本工業株式会社
- 13) 細川&リジャル: 日本建築学会関東支部研究発表会, pp. 133-136, 2011.3.

謝辞

短期的調査の実測調査では川本工業株式会社の田邊剛士氏と社員の方々とそのご家族の方に多大なご協力を頂いた。また、同僚の梅田真衣、小澤真之、勝野二郎、酒井匠、重野悠、西村美沙紀、細川陽平、室本真紀にデータ入力に協力して頂いた。記して謝意を表す。

- *1 東京都市大学環境情報学部 学部長
- *2 東京都市大学環境情報学部 講師・博士 (工学)
- *3 川本工業(R&D 事業部設計部開発課 博士(工学)