

適応モデルに関する研究

その4 リビングにおける居住者の快適温度と適応のメカニズムの検討

正会員 ○勝野二郎*
 正会員 リジャル H.B.**
 正会員 宿谷昌則***
 正会員 菊池世欧啓****

リビング 熱環境 実測
 熱的適応 適応モデル 快適温度

1. はじめに

2011年3月11日に起きた東日本大震災は、多くの人々が節電や省エネを意識させることになり、将来起こり得る地震や環境問題への対応という観点から住宅の安全・健康を確保でき、電力を浪費することなく生活の仕方を改めて見出していく必要があるが、そのためには居住者が快適であると知覚する環境とは何かを把握し、居住者にとって暑くも寒くもない環境状態に対応する快適温度を明らかにする事が重要であると考えられる。

快適温度はオフィスや実験室などの環境調整行動に制約がある場合と一般の住宅のように制約が小さい場合では快適温度は異なる可能性がある。

例えば、実験室実験は、田辺ら¹⁾が検討を行っている。オフィスビルを対象とした研究では三浦ら²⁾や Indragantiら³⁾が行った快適感についての調査などが挙げられる。実際の住宅での実測は日本では、中谷ら⁴⁾、リジャルら^{5),6)}、海外ではリジャルら^{7),8)}、Nicol & Roaf⁹⁾の研究が挙げられる。

上述のように住宅における環境調整行動はかなり大きな自由度があると考えられるが、これは適応が可能であることを示している。Brager & de Dear¹⁰⁾は適応には生理、行動、心理の3種類の適応があると示している。これらについて居住者の実際の生活での熱環境に対する適応を考察する必要がある。

以上の事から、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、自然換気時や冷暖房使用時における快適温度を求め、居住者が暑い、もしくは寒い環境にどのように適応しているかを行動的・生理的・心理的適応の観点からの考察と、日本では検討が行われていない適応モデルを提案することを目的とした。

2. 調査方法

測定は東京都、神奈川県に住居30軒を対象に2012年7月～2013年6月の間に行った。室温、相対湿度は小型温湿度計を用いて10分間隔で測定した。対象者の年齢は20～73歳で、男性25名、女性27名、計52名である。本研究で用いた申告内容と尺度を表1示す。申告項目は寒

暑感、発汗感である。寒暑感の「どちらでもない」では補足説明として「寒くも暑くもない」も入れた。申告は一日数回居住者の任意の時間で行った。窓開閉(0=閉鎖、1=開放)、扇風機(0=On、1=Off)、冷房利用(0=On、1=Off)、暖房利用(0=On、1=Off)の申告はバイナリ形式で行った。得られた申告数は13081である。

表1 申告項目

寒暑感	発汗感
今、気温をどのように感じていますか?	今、汗をどの程度かいていますか?
1.非常に寒い 2.寒い 3.やや寒い 4.どちらでもない (寒くも暑くもない) 5.やや暑い 6.暑い 7.非常に暑い	1.まったくない 2.少しある 3.ある 4.多量にある

3. 結果と考察

本研究では申告時に冷暖房がOffの申告の場合をFRモード(Free Running Mode、非冷暖房)、冷房がOnの申告の場合をCLモード(Cooling Mode)、暖房がOnの時をHTモード(Heating Mode)とした。

3.1 申告中の温熱環境と居住者の寒暑感申告

リビングの温熱環境と居住者の温熱感覚を明らかにするために、図1に月別のFRモードにおける申告時の室温、図2に月別の寒暑感の分布を示す。表2に季節別の申告中の室温と平均寒暑感を示す。夏のFRモードの平均室温は28.0℃、CLモードで27.6℃であり、冬はFRモードで17.8℃、HTモードで19.3℃であり、居住者は幅広い環境で申告している。

表2 申告時の温熱環境と寒暑感

季節	Mode	室温(℃)			寒暑感		
		度数	平均	SD	度数	平均	SD
春	FR	2378	22.3	2.8	2377	3.9	0.6
	CL	18	26.0	1.1	18	4.4	0.7
	HT	360	21.0	2.2	360	3.5	0.7
夏	FR	2052	28.0	2.4	2090	4.6	0.8
	CL	1386	27.6	1.7	1584	4.3	0.7
秋	FR	3327	23.5	3.4	3344	3.8	0.7
	CL	599	27.1	1.9	672	4.1	0.6
	HT	222	19.4	2.6	222	3.5	0.8
冬	FR	1209	17.8	3.5	1207	3.3	0.9
	HT	1209	19.3	2.7	1209	3.6	0.7

SD: 標準偏差

夏の寒暑感はFRモードで4.6、CLモードで4.3であった。冬はFRモードで3.3、CLモードで3.6であり、モードによる大きな差はみられなかった。春と秋においてもモードによる大きな差はみられなかった。

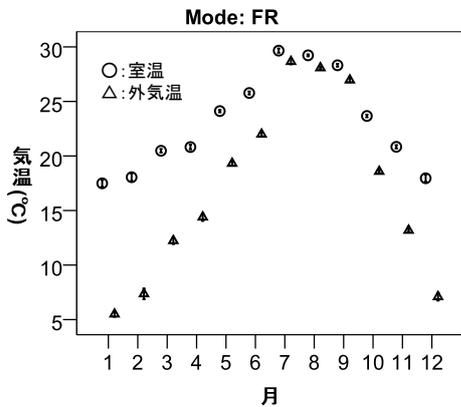


図1 月別の室温と外気温の分布

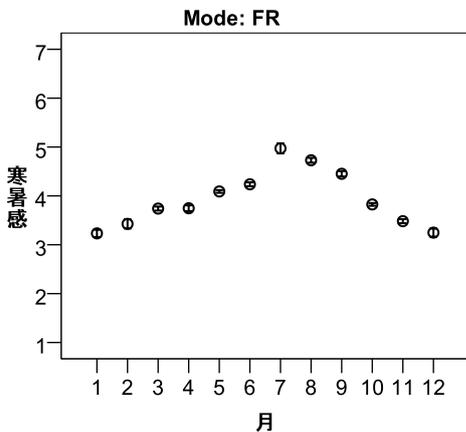


図2 月別の寒暑感の分布

3.2 Griffiths 法による快適温度の予測

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、Griffiths 法を用いて快適温度を検証する^{5), 11)}。Griffiths 法は回帰係数を仮定して「どちらでもない(寒くも暑くもない)」に相当する気温を算出して快適温度とする方法であり、下記の式で表される。

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

T_c : Griffiths 法による快適温度(°C)、 T_i : 室温(°C)、4: 寒暑感申告「どちらでもない(寒くも暑くもない)」、 C : 寒暑感申告、 a^* : 回帰係数である。既往研究より a^* は 0.5を仮定する。これは寒暑感の7尺度段階に対して2°Cの差を想定する事を意味している。

図3に月別のFRモード時の快適温度、表3に季節別の快適温度の平均値を示す。夏の平均快適温度はFRモードで26.8°C、CLモードで27.2°Cであり、モードによる差はほぼみられなかった。また、快適温度は寒暑感「どちらでもない」申告時の室温と類似していた(表3)。これらの

傾向は季節別にみても同じ傾向がみられた。居住者は高い温度に快適に感じているのは、窓開放、冷暖房使用、扇風機使用などの様々な適応によるものであると思われる。

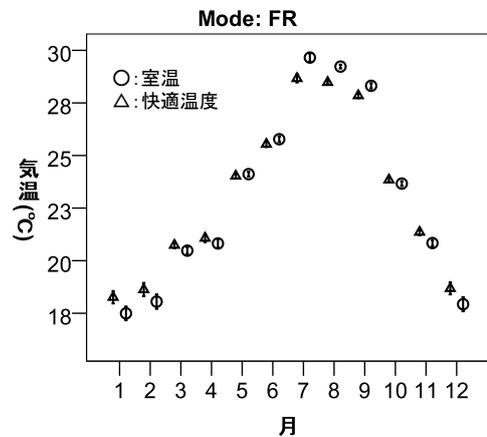


図3 月別の快適温度の分布

表3 快適温度の平均値と標準偏差

季節	Mode	「どちらでもない」申告時の室温(°C)			Griffiths法における快適温度(°C)		
		度数	平均	SD	度数	平均	SD
春	FR	1784	22.6	2.4	2377	22.5	2.4
	CL	7	25.8	1.2	18	25.2	1.9
	HT	191	21.3	2.1	360	22.1	2.2
夏	FR	1074	27.1	2.3	2052	26.8	2.2
	CL	951	27.4	1.7	1386	27.2	1.8
秋	FR	2059	23.8	3.1	3327	23.9	2.9
	CL	448	27.1	1.8	599	27	1.9
	HT	131	20.4	1.8	222	20.4	2.4
冬	FR	571	19.6	2.7	1207	19.1	2.9
	HT	794	19.9	2.6	1209	20.1	2.5

3.3 適応モデル

適応モデル(Adaptive model)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¹²⁾。外気温と履歴を考慮するために、本研究でも T_{rm} を用いる。 T_{rm} は下記の式で計算した¹³⁾。

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

T_{od-1} は前日の日平均外気温(°C)、 T_{rm-1} は前日の移動平均外気温(°C)である。初日の移動平均外気温(T_{rm})は外気温と同じ数値を仮定した。 α は前日までの平均外気温が当日に対してどのぐらい影響するかを示す重み係数であり、本研究では0.8を用いた。図4にFRモードのGriffiths法による快適温度と移動平均外気温の関係を示す。得られた回帰式は下記に示す。

$$T = 0.398 T_{rm} - 16.441 \quad (n=8963, R^2=0.618, p=0.001) \quad (3)$$

CEN基準の適応モデルの回帰係数は0.33であり、本研究の方が少し高い。居住者は幅広い範囲で快適に感じている。この原因は住宅ではオフィスよりも環境調整行動が自由に行うことができるためと思われる。このように、居住者が暑熱環境に適応していると思われるため、次節では居住者の行動的適応・生理的適応・心理的適応について考察する。

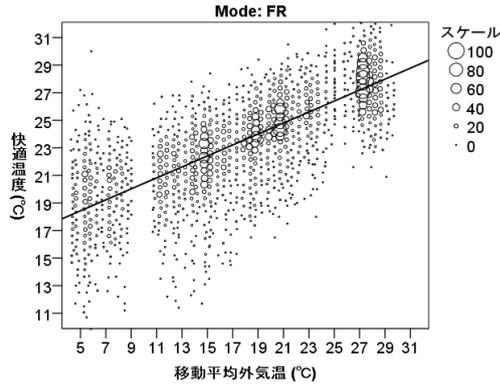


図 4 FR モードの適応モデル

3.4 暑熱環境への適応

3.4.1 行動的適応

現代の住宅では窓開閉や冷房・扇風機の使用など、居住者が様々な行動的適応を行うことができる。窓開放、扇風機使用、冷房使用と暖房使用を予測するために、室温や外気温度とのロジスティック回帰分析を行う^{5),6)}。得られた回帰式を下記に示す。

窓開放

$$\text{logit}(p) = 0.383T_i - 9.938 \quad (n=12749, R^2=0.178, p<0.001) \quad (4)$$

扇風機使用

$$\text{logit}(p) = 0.421T_i - 12.653 \quad (n=12749, R^2=0.188, p<0.001) \quad (5)$$

冷房使用

$$\text{logit}(p) = 0.309T_o - 8.719 \quad (n=13067, R^2=0.162, p<0.001) \quad (6)$$

暖房使用

$$\text{logit}(p) = -0.259T_o - 1.410 \quad (n=13067, R^2=0.119, p<0.001) \quad (7)$$

ここで、 n はサンプル数、 R^2 は Cox and Snell の決定係数、 p は有意水準である。居住者は室温が安定した状態で申告を行っている可能性があるため、冷房使用と外気温度の関係のみの回帰式を示す。図 5 に環境調整行動と外気温度のロジスティック回帰曲線を示す。図中のプロットは 1°C おきに平均した値である。窓開放、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と窓開放率は上る傾向があるため、行動的適応を行っているといえる。冷房使用においても外気温が上がるにつれ使用の割合が上がっており、暖房使用では外気温が下がるにつれ使用の割合が高くなるため、行動的適応がみられる。リジャル&中谷¹⁴⁾が行った岐阜県の冷暖房利用と外気温度の関係でも同様の傾向が示されている。

3.4.2 生理的適応

発汗は、暑さに適応しようとして生じる生理的な反応の一つである。図 6 に夏の発汗と室温の関係を示す。本研究では、FR モードの方が CL モードよりも発汗と室温の相関関係は高く、生理的な適応がみられた。

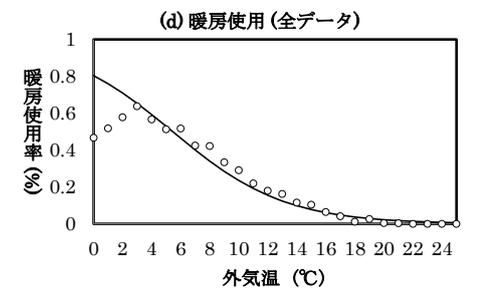
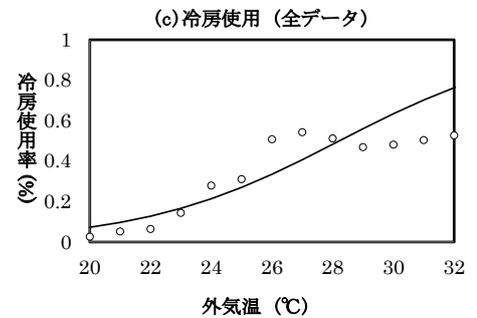
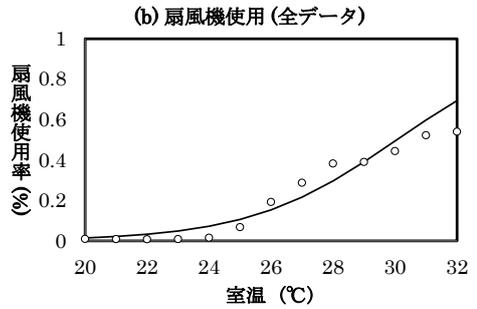
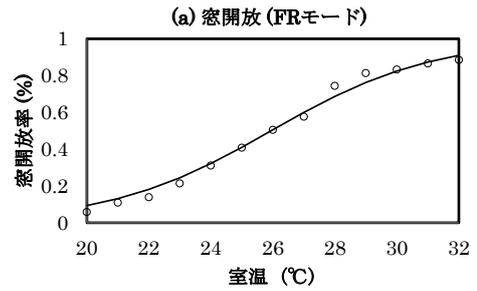


図 5 環境調整行動と外気温度、室温の関係

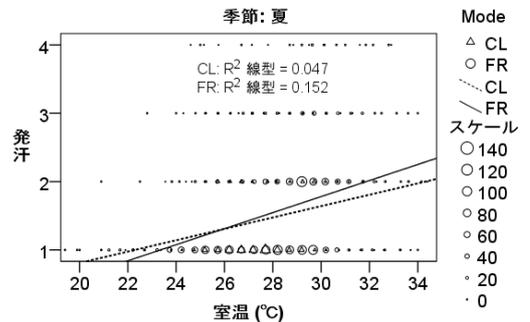


図 6 発汗と室温の関係

3.4.3 心理的適応

最後に心理的適応について考察する。心理的適応について明確な定義はないが、本研究では状態の範囲の予測

¹⁵⁾の観点から想像温度に焦点を当て分析する。表4に実際の室温と想像室温の差、寒暑感「4.どちらでもない」と申告した場合の申告中の室温と想像室温の差を示す。夏の室温と想像室温の差の平均値はFRモードで1.5K、CLモードで0.8Kであり、両モードとも実際の室温よりも想像室温の方が低めになっている。

居住者は実際に想像温度よりも高い温度の環境で生活しており、居住者は高めの温度に適応していると思われる。即ち、居住者が低い温度と思えるように適応しているのだろうと思われる。寒暑感「4.どちらでもない」時の室温と想像温度の差はFRモードで2.1K、CLモードで0.9Kであり、寒暑感で最も快適に感じている場合でも室温を低めに想像している。斎藤¹⁶⁾の研究では想像温度と実際の温度の差の平均が1℃付近である結果が半数以上を占めており、本研究の結果とも同様の結果となっている。

表4 室温と想像室温の差

項目	季節	Mode	度数	平均	SD
想像室温(℃)	夏	FR	2089	26.5	2.9
		CL	1584	26.7	1.7
室温－想像室温(K)	夏	FR	2051	1.5	2.1
		CL	1386	0.8	1.9
寒暑感「どちらでもない」申告時の室温－想像室温(K)	夏	FR	1073	2.1	2.0
		CL	951	0.9	2.0

SD:標準偏差

4. まとめ

本研究では、関東地域の住宅を対象にリビングにおける温熱環境の実測と居住者の熱的主観の申告調査を行い、下記の結果が得られた。

- 夏の平均快適温度はFRモードで26.8℃、CLモードで27.2℃であり、冬のFRモードで19.1℃、CLモードで20.1℃である。
- 本研究で提案した適応モデルとCEN基準の適応モデルを比較すると、回帰係数は本研究の方が少し高く、居住者は幅広い範囲で快適に感じている。この原因は住宅ではオフィスよりも環境調整行動が自由に行うことができるためと思われる。
- 室温や外気温度が上がるにつれて、窓開閉率、扇風機・冷暖房使用率は上がる傾向がみられた。生理的適応は室温が上がるにつれ、発汗量が上がり、心理的適応は実際の室温より居住者の想像温度の方が低く想像していることが明らかになった。

謝辞

実測調査と申告調査に住民の方々に多大なご協力を頂いた。本研究は科研費(基盤研(C):24560726)の助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 田辺新一、堤仁美、鈴木孝佳：オフィス空間における湿度が熱的快適性に与える影響に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.109、pp.1-9、2006.4.
- 三浦豊彦、阿久津綾子、鈴木素子：至適温度の季節変動に関する研究(第6報)：事務員の温熱感、快適感、健康状態の季節変動、労働科学、第43巻、第12号、pp.683-712、1967.
- Indraganti M., Ooka R. & Rijal H.B.: Thermal comfort in offices in summer: Findings from a field study under the 'Setsuden' conditions in Tokyo, Japan, *Building and Environment* 61, pp. 114-132, 2013.
- 中谷岳史、松原斎樹、藏澄仁美：関西地域の住宅における熱的快適性に関する実態調査：夏期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.
- リジャル H.B.・本庄美穂・小林良太・中谷岳史：住宅における適応的快適性と環境調整行動に関する研究、日本建築学会 第42回熱シンポジウム、pp.107-114、2012.11.
- Rijal H.B., Honjo M., Kobayashi R. & Nakaya T.: Investigation of comfort temperature, adaptive model and the window opening behaviour in Japanese houses, *Architectural Science Review* 56(1), pp. 54-69, 2013.
- Rijal H.B., Yoshida H, Umemiya N: Seasonal and regional differences in neutral temperatures in Nepalese traditional vernacular houses, *Building and Environment* 45, pp. 2743-2753, 2010.
- Rijal H.B. & Stevenson F.: 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.
- Nicol F. & Roaf S.: Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan project, *Energy and Buildings* 23, pp. 169-174, 1996.
- Brager G.S. & de Dear R.J.: Thermal adaptation in the built environment: A literature review, *Energy and Buildings* 27, pp. 83-96, 1998
- Griffiths I.D.: Thermal comfort in building with passive solar features: field studies. Report to the Commission of the European communities. EN3S-090 UK: University of surrey Guild ford; 1990.
- Humphreys M.A.: Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research and Practice (Journal of CIB)* 6 (2), pp. 92-105, 1978.
- 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.
- リジャル H.B.、中谷岳史：岐阜の住宅における冷暖房利用に関する研究、東京都市大学 環境情報学部 紀要、第14号、pp.15-21、2013.2.
- 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 (Humphreys M.A.)、空気調和・衛生工学会 第83巻 第6号、pp.413-419、2009.6.
- 斎藤雅也：ヒトの想像温度と環境調整行動に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第646号、pp.1299-1306、2009.12.

*東京都市大学 研究生

**東京都市大学 准教授・博士(工学)

***東京都市大学 教授・工博

****川本工業(株)ソリューション部 博士(工学)

* Researcher, Tokyo City University.

** Assoc. Professor, Tokyo City University, Dr. Eng.

*** Professor, Tokyo City University, Dr. Eng.

**** Kawamoto Industry Corporation, Dr. Eng.