

## 岐阜の住宅における熱的快適性に関する実態調査

## その4 適応モデルの提案

4.環境工学-10.温熱感

準会員 ○ 小林良太 \*1 正会員 H.B.リジャル \*2 正会員 中谷岳史 \*3

住宅 リビング 気温  
Griffiths 法 快適温度 適応モデル

## 1. はじめに

人々はその土地や気候、文化に合わせて生活をしている。すなわち、その環境に対し、適応しているということである。Humphreys&Nicol によると適応とは生理的であり、行動的であり、心理的である<sup>1)</sup>。人はある温熱環境に対し、不快に感じるような変化が起こると快適性を取り戻そうと行動する傾向がある<sup>2)</sup>。人は温熱環境をただ受け入れるだけでなく、自らその環境に合わせて調整をし、適応している。人々の適応できる快適範囲を予測するため、適応モデル(Adaptive Model: アダプティブ・モデル)が提案されている。

適応モデルは平均外気温に対し、快適温度を予測するモデルである<sup>3)</sup>。近年ではASHRAE<sup>4)</sup>やCEN<sup>5)</sup>による適応モデルに関する基準が提案されているが、これらの適応モデルは欧米のオフィスを中心としており、日本のデータが含まれていない。そのため、異なる気候風土と生活習慣を持つ日本でどの程度利用できるかが明らかではない。また、住宅はオフィスに比べ自由に温熱環境を調整できるため、日本の住宅独自の適応モデルを提案する必要がある。近年では日本の住宅を対象とした適応モデルの提案がみられるが<sup>6)~8)</sup>調査期間は夏季に限定されている。

そこで本研究では岐阜県の住宅を対象に年間を通して温熱環境の実測と居住者の熱的主観申告調査を行い、日本の住宅における適応モデルを提案する。

## 2. 調査方法

調査対象地域は岐阜県岐阜市近郊である。住戸種類は戸建て住宅であり、平屋もしくは2階建てである。調査住戸数は30家族、調査人数は78名(男性40名、女性38名)で平均年齢は男性40.5歳、女性41.3歳である<sup>9)</sup>。温冷感尺度を用いた尺度を図1に示す。

調査は2010年5月13日から2011年5月31日までである。室温は小型測定機器を用いて10分間隔で測定した。外気環境のデータは、気象庁の公開データを用いた。観測地点は調査住戸の中心に位置する岐阜県岐阜市を用いた。

今あなた自身の暑さ寒さはどの程度感じていますか



図1 温冷感尺度

## 3. 分析方法

## 3.1 快適温度の算出法

快適温度はGriffiths法<sup>10)~12)</sup>を用いて計算する。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いかない場合がある。そこで本研究では下記の式を用いてGriffiths法を用いて快適温度を検証する。

$$T_c = T + (5 - C) / \alpha \quad (1)$$

$T_c$ : Griffiths法による快適温度(°C)、 $T$ : 室温(°C)、 $C$ : 温冷感申告、 $\alpha$ : 回帰係数である。

NicolらはGriffiths法を適用するにあたって、1)0.25、2)0.33、3)0.50の3通り回帰係数を用いている。1)0.25はフィールド調査において度々得られる係数値である。2)0.33はFangerの実験室実験からProbit法によって得られた係数値である。3)0.50はHumphreysらがよく用いる係数値である<sup>11)</sup>。これら3つの回帰係数を9段階に換算すると、1)0.33(=0.25×8/6)、2)0.44(=0.33×8/6)、3)0.67(=0.50×8/6)となる。本研究ではこれら3つの回帰係数を用いて快適温度を検討する。

## 3.2 移動平均外気温の算出方法

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、次式で表される。

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

$T_{rm-1}$ は前日の移動外気温(°C)、 $T_{od-1}$ は前日の日平均外気温(°C)である。なお、第1日目の平均外気温は日平均気温とした。 $\alpha$ 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、本研究では既往研究より0.8と仮定した<sup>3)</sup>。

## 4. 結果と考察

### 4.1 温冷感申告と室温の分布

温冷感と室温の関係を分析するため、図2に温冷感、図3に室温の分布を示す。図はNVモード（自然換気）とAC（冷房使用時）とHT（暖房使用時）に分類した。温冷感申告の平均はNVモードで5.0、ACモードで5.6、HTモードで4.2である(図2)。ACモードでは暑い側の申告がやや多く、HTモードでは寒い側の申告がやや多くなっている。居住者が冷暖房を利用していても「暑い」または、「寒い」と感じている。平均室温はNVモードで22.7℃、ACモードで28℃、HTモードで17.7℃である(図3)。NVモードでは「5.暑くも寒くもない」の申告が最も多く居住者が温熱環境に満足しているといえる。

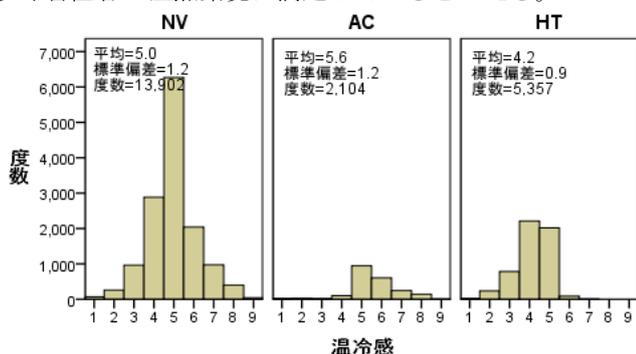


図2 温冷感の分布

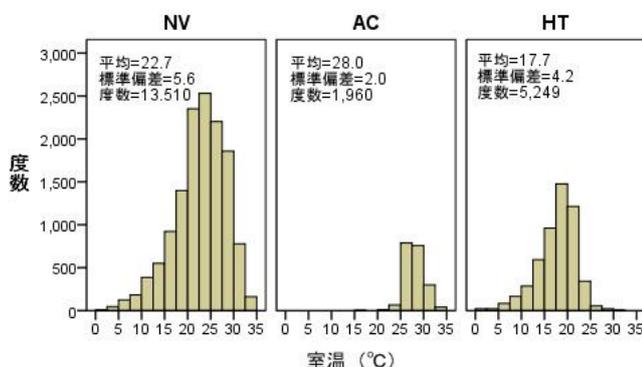


図3 申告時の室温分布

### 4.2 Griffiths法による快適温度

表1に各係数ごとの室温による快適温度を示す。NVモードの快適温度に各係数ともあまり差がない。これは温冷感の申告が「5.暑くも寒くもない」付近に集まっているためと思われる。ACとHTモードの平均快適温度に約1℃の差があり、標準偏差も約1℃の差がある。

図4に各温冷感申告と室温と回帰係数0.67を用いて計算した快適温度の分布を示す。回帰係数は既往研究と比較するため0.67を用いた。平均快適温度はNVモードで22.7℃、ACモードで27.1℃、HTモードで18.9℃である。平均室温(図3)と比べると快適温度はNVモードでほとんど差がみられない。ACモードでは平均室温に比べ快適温度は約1℃低く、HTモードでは約1℃高い。

表1 Griffiths法による快適温度

Mode	回帰係数	室温による快適温度(℃)		
		度数	平均値	標準偏差
NV	0.33	13,472	22.8	4.0
	0.44	13,472	22.8	4.2
	0.67	13,472	22.7	4.5
AC	0.33	1,956	26.2	3.7
	0.44	1,956	26.7	3.0
	0.67	1,956	27.1	2.4
HT	0.33	5,241	20.3	4.3
	0.44	5,241	19.7	4.1
	0.67	5,241	19.1	4.1

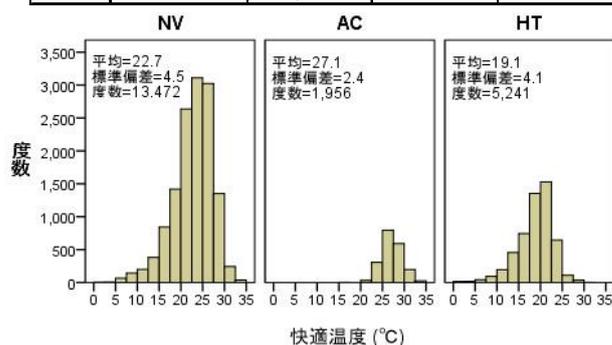


図4 回帰係数0.67と室温を用いて算出した快適温度

### 4.3 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<sup>4),5)</sup>。本研究で $T_{m}$ を用いたのは平均外気温よりも快適温度との関連性が高いためである。表2に各係数ごとの室温における回帰式を示す。NVモードでは相関係数が高い。また、決定係数は各モードともに回帰係数0.67の場合が最も高い。

CEN基準の回帰係数はNVモードで0.33であり、NVモードで回帰係数0.33を用いた場合に類似している。回帰係数0.44、0.67の場合、両者とも本研究の方が高い。CEN基準はオフィスビルを対象としており、本研究と直接比較はできないが、自由に環境調節行為のできる住宅では結果が異なると考えられる。

表中の $T_p$ は回帰式を用いて移動平均外気温がNVモードで20℃、ACモードで28℃、HTモードで10℃の時の室内快適温度を予測した値である。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ことができる。

図5に室温におけるGriffiths法で計算した快適温度と移動平均外気温の関係を示す。回帰係数は0.67である。HTモードでは快適温度にややばらつきがみられる。本研究では暖房だけでなく、炬燵使用時もHTモードとしたため、室温が低くても快適に感じていると考えられる。過去に渡邊ら<sup>13)</sup>の研究により電力消費量90Wの炬燵使用時に、気温11℃において7℃を超える温熱効果があるといわれていることから本研究でも広い範囲で快適に感じていると思われる。

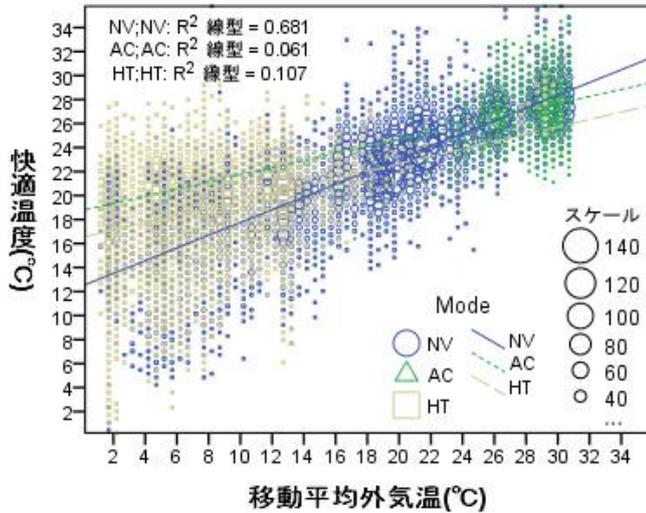


図5 快適温度と移動平均外気温の関係

表2 快適温度と移動平均外気温の回帰式

快適温度の算出	モード	回帰係数	回帰式	n	R <sup>2</sup>	p	T <sub>cp</sub> (°C)
T <sub>i</sub>	NV	0.33	T <sub>c</sub> = 0.361T <sub>rm</sub> + 15.8	13,471	0.40	<0.001	23.0
		0.44	T <sub>c</sub> = 0.444T <sub>rm</sub> + 14.2	13,471	0.56	<0.001	23.1
		0.67	T <sub>c</sub> = 0.531T <sub>rm</sub> + 12.5	13,471	0.68	<0.001	23.1
	AC	0.33	T <sub>c</sub> = 0.244T <sub>rm</sub> + 19.5	1,955	0.02	<0.001	26.3
		0.44	T <sub>c</sub> = 0.270T <sub>rm</sub> + 19.1	1,955	0.03	<0.001	26.7
		0.67	T <sub>c</sub> = 0.297T <sub>rm</sub> + 18.8	1,955	0.06	<0.001	27.1
	HT	0.33	T <sub>c</sub> = 0.232T <sub>rm</sub> + 18.4	5,240	0.06	<0.001	20.7
		0.44	T <sub>c</sub> = 0.269T <sub>rm</sub> + 17.5	5,240	0.08	<0.001	20.2
		0.67	T <sub>c</sub> = 0.307T <sub>rm</sub> + 16.5	5,240	0.11	<0.001	19.6

T<sub>i</sub>: 室温(°C)、T<sub>c</sub>: Griffiths法による快適温度(°C)、T<sub>rm</sub>: 移動平均外気温(°C)、n: サンプル数、R<sup>2</sup>: 決定係数、p: 回帰係数の有意水準、T<sub>cp</sub>: 予測快適温度(NV=20°C、AC=28°C、HT=10°Cの場合)

#### 4.4 既往研究との比較

図7に Nicol&Humphryeys らの適応モデルの図を引用する<sup>14)</sup>。図8に本研究で得られた結果から快適温度と移動平均外気温の関係を示し、局所的重み付け曲線も示す。

曲線を見ると、約25~30°Cの暑い環境では両者にあまり差がなく、同様の結果となっている。既往研究の図7では約12°Cから外気温が下がっても快適温度はほぼ一定である。一方、本研究では約12°Cから外気温が下がると快適温度も緩やかに下がっている。Nicol&Humphryeys らの調査ではオフィスを対象としており、オフィスでは環境調節行為を自由に行えないため低い気温に適応することができないと思われる。一方、本研究は住宅を対象としているためオフィスに比べ、自由に環境調節行為ができるので外気温が低くても適応できると思われる。しかし、本研究とは調査対象が異なるため直接比較することはできないが、今後さらに検討する必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、岐阜地域の住宅を対象に一年間における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. 温冷感申告の平均はNVモードで5.0、ACモードで5.6、HTモードで4.2である。平均室温はNVモードで22.7°C、ACモードで28°C、HTモードで17.7°Cである。
2. Griffiths法による各係数ごとの快適温度はNVモードではあまり差がなかった。ACとHTモードの平均快適温度に約1°Cの差がみられた。
3. 適応モデルを用いることで外気温度が分かれば、室内快適温度を予測することができる。
4. 本研究によって得られた適応モデルと既往研究を比較すると、外気温が高い場合は類似していたが、外気温が低い場合に異なる結果となった。

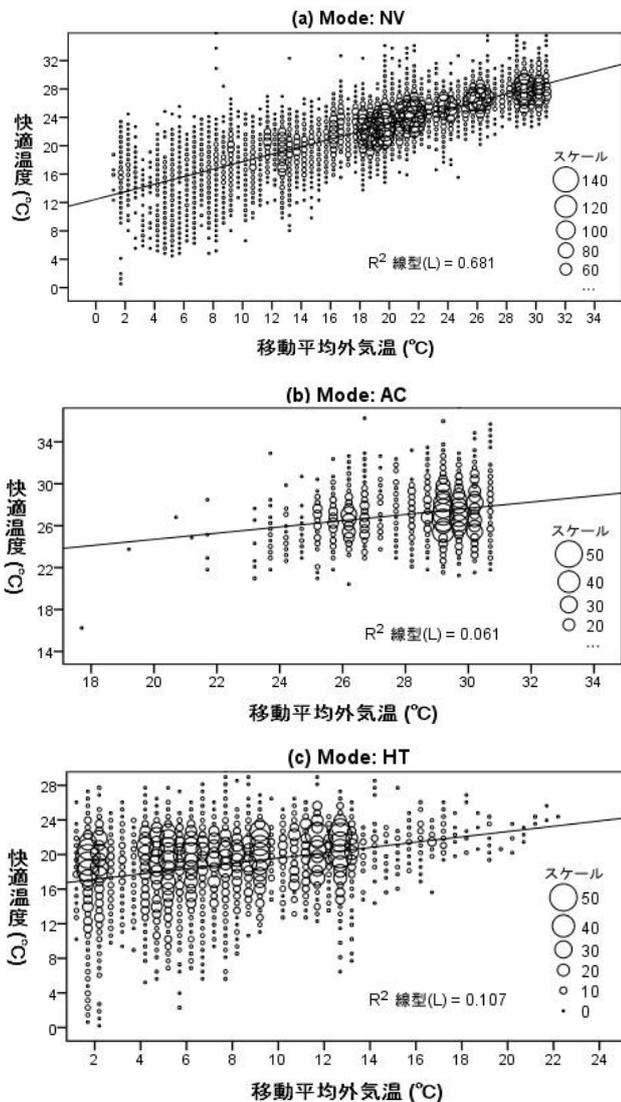


図6 各モードの快適温度と移動平均外気温の関係

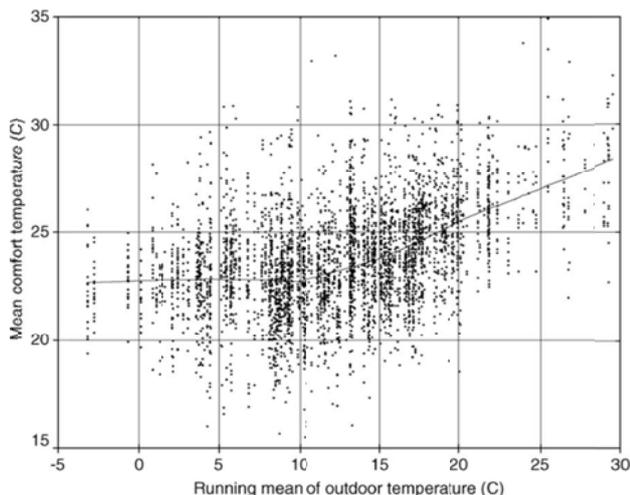


図7 Nicol&Humphreys の適応モデル

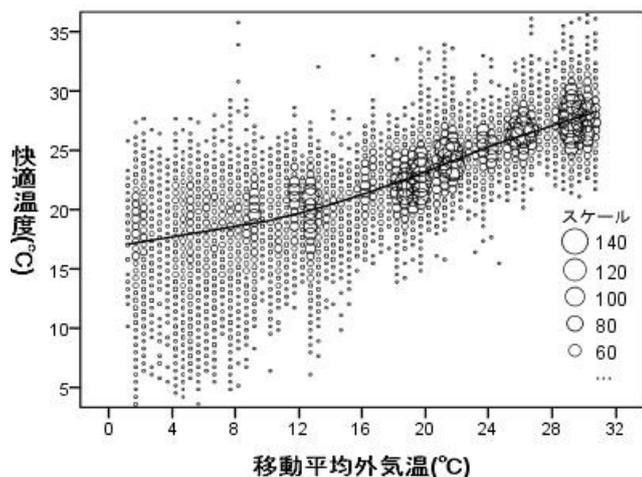


図8 本研究の適応モデル

## 謝辞

実測調査には丸平建設株式会社の林重元氏に多大なご協力を頂いた。記して謝意を表す。

## 参考文献

1. Humphreys M.A. and Nicol J.F. (1998) Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort, *ASHRAE Transactions* 104(1), pp. 991-1004
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 (M.A. Humphreys)、*空気調和・衛生工学会* 第83巻 第6号、pp. 413-419、2009.6.
3. 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
4. ASHRAE Standard 55 (2004), *Thermal environment conditions for human occupancy*, Atlanta, Georgia, American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers.

5. Comité Européen 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.
6. 吉村咲希、リジャル H.B.：関東地方における住宅の快適温度と適応モデルに関する研究、*日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)*、D-2、pp. 27-28、2011.8.
7. 梅田真衣、リジャル H.B.：住宅における好まれる温度と適応モデルに関する研究、*日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)*、D-2、pp. 29-30、2011.8.
8. 西村美沙紀、リジャル H.B.：寝室における快適温度と睡眠の質に関する研究、*日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)*、D-2、pp. 31-32、2011.8.
9. 中谷岳史、石川孝二、山崎真理子、佐々木康寿、リジャル H.B.、林重元：岐阜県の住宅における蒸暑期間の温熱的快適性に関する実態調査：夏期中立温度の算出、*日本建築学会東海支部研究発表会*、2011.2.
10. 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.
11. F Nicol, GN jamy, O sykes, M Humphreys, S Roaf, M Hancock: *A survey of Thermal Comfort in Pakistan toward New Indoor Temperature Standards*, Oxford Brookes University, School of Architecture, 1944.7.
12. Rijal H.B., Tuohy P., Humphreys M.A., Nicol J.F., Samuel A., Raja I.A. and Clarke J. (2008), Development of adaptive algorithms for the operation of windows, fans and doors to predict thermal comfort and energy use in Pakistan buildings, *ASHRAE Transactions* 114(2), pp. 555-573.
13. 渡辺慎一、堀越哲美、三好結城、宮本征一：炬燵使用時における人体の熱的快適性の検討とその温熱効果の定量化、*日本建築学会計画系論文集*、第497号、47-52、1997.7
14. Nicol J.F. and Humphreys, M.A. Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort. *Solar Energy* 81 (3), pp295-304,2007

\*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 岐阜工業高等専門学校 講師・修士 (工学)