

夏期の岐阜の住宅における熱的快適性の適応モデルの算出

正会員  
正会員

○中谷岳史<sup>1\*</sup>  
Rijal Hom Bahadule<sup>2\*\*</sup>

住宅  
適応モデル

室内熱環境

熱的快適性

## 1. 背景目的

温暖化対策は政府や企業だけでなく住宅部門にも求められ、空調管理においては快適性と省エネルギーの両立が要求されている。IPCC4th レポート<sup>1)</sup>では地球温暖化の対策として適応を挙げており、注目が集まっている。

建物居住者は、熱ストレスに対し、かなりの適応能力を備える。外気温度の変動に適応することで、中立温度を変化させ、熱ストレスを減じることが予想される。

熱的快適性に関する実態調査は、オフィス調査が中心であった。住宅は被験者が分散し、同意が必要になるため、調査が困難である。筆者は兵庫県及び大阪の住宅居住者を対象に2005年8月、2006年2月に実態調査を行い、夏季の中立温度は27.6℃<sup>2)</sup>、冬季は10.9℃<sup>3)</sup>と季節差の存在を明らかにした。また夏冬とも室内熱ストレスは大きいにも関わらず、居住者の8割程度が室内環境を受け入れていた。これらの結果から、居住者は適応により、季節に応じて快適温度を変化させ、室内温熱環境を受容していることが予想される。しかし期間がヶ月程度であった為、外気温度の変動に伴う一日単位の中立温度の詳細な変化を探ることができなかった。また申告数が500申告程度であり、熱的快適性の適応モデルを検討するには、更に大きな規模で調査実施する必要があった。

本研究では岐阜県の木造住宅居住者を対象とした実態調査を行い、温熱環境と居住者の温熱感覚を把握し、梅雨前から夏までの蒸暑期間中の中立温度の変動を明らかにすることを目的とする。

## 2. 方法

### 2.1 調査方法

本調査では、岐阜県の木造住宅居住者を対象に温熱的快適性に関する室内温熱環境の実測と主観申告調査を行った。調査は2010年5月13日から開始し、1年間のデータ収集を予定している。本報では夏季分報告する。

#### 2.1.1 調査対象

調査対象地域は岐阜県岐阜市近郊である。住戸種類は戸建住宅であり、平屋もしくは二階建てであった。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才(9~66才)、女性41.3才(7~79才)であった。被験者には事前に調査内容の説明を行い、

調査の承諾を得た。若年者及び高齢者は事前調査で室内環境を言語で評価することに問題がないことを確認している。なお疾患を有する被験者や、調査内容を理解することが難しい幼児は調査対象から外した。また調査期間中に被験者から調査中断の申し出や要望があれば、速やかに対応した。

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。

#### 2.1.2 室内温熱環境の測定

調査項目は室内温熱環境とアンケート調査である。

室内の温熱環境は測定項目を表に示す。空気温度及び相対湿度は携帯型データロガー(T&D,TR-71, TR-72),グローブ温度(Sibata,150 mm φ)である。人室内に設置する際には、日射や電気機器などの影響が少ない地点に置くように依頼した。アンケートは申告時の人体側要因(代謝量,着衣量)と主観申告で構成した。人体側要因は、主観申告時にアンケート形式で回答してもらった。代謝量は申告前の活動強度から推定した。着衣は総重量を記入してもらい推定した。

主観申告を表1に示す。温熱的快適性に関する項目として、寒暑感(9段階), 適温感(3段階), 熱的快適感(5段階), 熱的受容感(2段階), 我慢感(2段階), 体調(4段階)を用いた。主観申告は一人につき1ヵ月のうち約10日間、1日に4回(起床~12時,12時~16時,16時頃~20時,20時~就寝)、それぞれ一回申告するよう依頼した。ただし指定時間中の回答が困難であれば1時間以上の間隔をあけて申告することを認めた。

#### 2.2 分析方法

熱的快適性の適応モデルは、室内空調方式毎に、説明変数に外気温度、目的変数に中立温度を配し、線形回帰による平均及び受容限界で構成されている。

空調方式は、Mixed方式と自然通風方式、空調方式の三種類を対象とした。

外気温度には、CENに基づき、移動平均外気温度を採用した。

$$T_{rm}=(T_{od-1}+0.8T_{od-2}+0.6T_{od-3}+0.5T_{od-4}+0.4T_{od-5}+0.3T_{od-6}+0.2T_{od-7})/3.8$$

$T_{rm}$ :移動平均外気温度 [°C]

移動平均外気温度は、該当日の前日から 7 日間を対象とし、重みづけした外気温度である。中立温度は外部環境に適応した結果と考えるならば、環境履歴を考慮している方が適している。

適応モデルの中央線は、一定集団の傾向を示す。全データに対して、外気温度と中立温度の線形回帰分析することで求める。中立温度の算出には、回帰法と Griffiths 法<sup>4)</sup>がある。本実験では Griffiths 法を用いる。受容限界 (acceptability limits) は、居住者の集団における受容率を示す。熱的中立で熱的快適が最少になるとすれば、中立から解離するほど受容率は低下する。受容限界は、90%と 80%の二種類とした。個々の申告について、Griffiths 法で算出した中立温度から室内作用温度を減じ、中立温度からの差を次式で算出した。

$$T_{diff} = T_n - T_{op}$$

thermal acceptability は、温熱的主観申告の種類によって、複数の定義が存在する。寒暑感は中央の 3 段階(-1~+1)、熱的受容感は受容側、適温感は cooler、warmer の発生率とした。集団の 90%は ASHRAE 基準<sup>5)</sup>で 5℃、EN 基準<sup>6)</sup>で 4℃、80%は ASHRAE 基準で 7℃、EN 基準で 6℃の範囲である。

### 3 結果考察

#### 3.1 集計

主観申告数は、約 8700 申告、日平均申告数は約 90 であった。

図 1 に空調方式毎の外気温度と室内作用温度の関係を示す。Mixed 方式では、外気温度と室内空気温度は比例関係であった。また AC 方式は、外気温度・室内温度が 20℃以上で用いられている。このことから、冷房機器を連続運転して室温を一定温度に制御するのではなく、自然通

風が主体であり、冷房は間欠運転の傾向が得られた。

図 2 に空調方式毎の外気温度と室内作用温度の関係を示す。室内作用温度と寒暑感は、線形関係、熱的快適は 2 次曲線の関係が得られた。室内作用温度が高くなるにつれて、寒暑感は暑い側、熱的快適感は不快側となった。冷房方式時は、Mixed 方式、FR 方式よりも、寒暑感の線形回帰の勾配が小さくなり、不快側の増加傾向が低くなった。

図 3 に空調方式毎の主観申告の割合を示す。各空調方式で、寒暑感申告による受容は 80%、熱的受容感による受容は 90%程度であった。一方熱的快適感とは 40~50%程度であった。居住者の申告は、複数の階層が存在することが示唆された。

#### 3.2 時系列分析

5月中旬から9月中旬までの期間の外気温度、室内気温、居住者の主観申告の関係を捉えるため、図 4 に各項目を時系列で示した。

図 4 の 1 段目に主観申告時の室内外湿度の平均、最大、最小を示す。外気温度と同様の傾向を示しているが、最大、最小の幅は狭まっていた。7月下旬から9月初旬にかけて、平均室温は 30℃程度で推移していた。

2010 年 5 月は気温変動が大きく、中旬に最高気温が 30℃に達し、下旬に気温が低下した。梅雨期間中(6 月 13 日~7 月 17 日、気象庁 HP)は日射の影響で気温が細かく変動していた。7月下旬及び8月中旬から9月初旬は平年値を 5℃程度上回る時期もあった。

図 4 の 2 段目に、主観申告を示す。主観申告の割合を算出し、時系列に配置した。寒暑感は暑い側、快適、寒い側に三分類、適温感はより涼しく、変えなくてよい、より暖かくに 3 分類、熱的快適感とは快適、不快に 2 分類、受容感とは非受容、受容に 2 分類、我慢感とは我慢できる、我慢できない

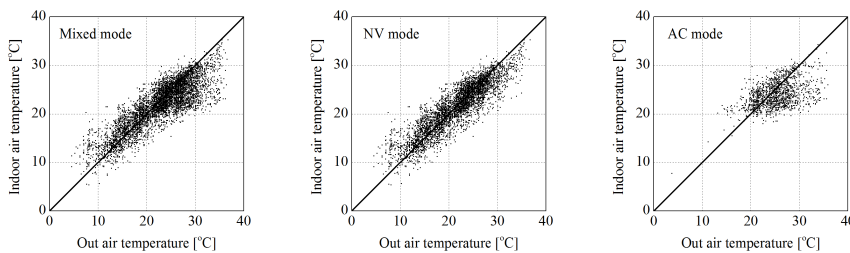


図 1 空調方式毎の外気温度と室内作用温度の関係

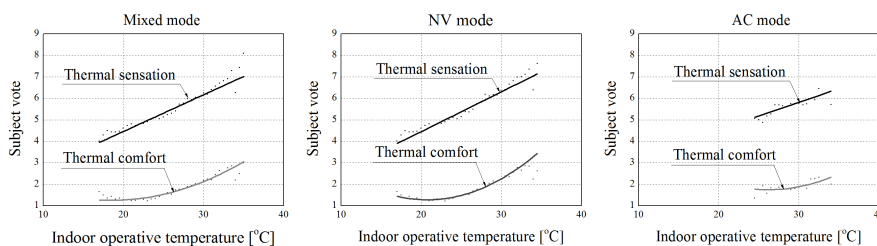


図 2 空調方式毎の室内作用温度と主観申告の関係

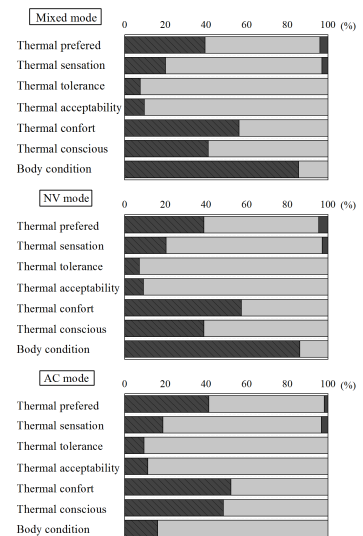


図 3 空調方式毎の主観申告の割合

に 2 分類、体調は体調が良い、悪いに 2 分類した。温熱的に不快もしくは体調が悪い時をグラフ上で黒く描いた。

適温感と寒暑感は、気温変動に対して同様の傾向が得られた。適温感は 6 月 13 日の梅雨入りまでは、「より暖かく」が見られたが、梅雨入り後から 9 月上旬まで「より涼しく」が高い割合をしめた。寒暑感も適温感同様、梅雨入りまでは「寒い側」の申告が見られたが、梅雨入り後は「暑い側」の割合が増加した。7 月下旬から 8 月上旬にかけてと 9 月上旬に 30~40%程度になり、気温の高さが主観申告に現れていた。適温感は寒暑感と比べ、暑熱ストレスが申告に強く現れていた。平均気温が 30℃を超える時期でも「中立(寒暑感中央 3 段階)」が 60%程度申告されていたが、適温感は 60~70%が「より涼しく」を選んでいて、受容率と我慢率は比較的同様の傾向が得られた。5 月下旬~7 月中旬まで、非受容率は 10~20%、10%以下で推移していた。7 月下旬から 8 月下旬にかけて非受容率、非我慢率は 10~20%であった。9 月上旬に最も非受容率、我慢率が高く、20~30%程度であった。熱的快適感で「不快側」は 5 月中にも申告され、梅雨入りから増大し、夏期期間中は 60~80%の高い割合を示した。平均気温は夏期の方が高いが、梅雨時期でも不快率が高かった。日本の梅雨特有の高い湿度が熱的快適性に影響したと考えられる。

図 4 の 3 段目は、Nicol グラフと呼ばれ、外気温度に対する中立温度の変動を表す。外気温度は平均・最高・最低の三種類のラインを描いた。中立温度は外気温度の最高と最低の範囲内で推移し、平均外気温度付近で変動していた。外気温度の変動に、短い間隔で中立温度が対応して変化する傾向が得られた。ただし 5 月下旬から 6 月上旬にかけては平均外気温度より中立温度は高くなった。急激な外気温度の変動には、時間遅れを伴い緩やかに対応していると思われる。夏期期間中は気温が高かったが、中立温度の最高値は 9 月 5 日の 29.8℃であり、30℃は超えていなかった。

図 5 に Mix 方式の夏期期間中のデータについて、Tdiff と不快率の関係を示す。全データの分析では、低温側の解を得ることはできなかった。そこで外気温度を 2℃毎に分類し、各温度で Tdiff と中立温度の 2 次回帰分析を行った。その結果を図 6,7 に示す。外気温度で分類して解析することで高温側・低温側の受容限界が求められた。なお 2℃は、統計的処理が可能な最小分割幅であることから決定した。図 6 は受容感を用いた直接的受容、図 7 は寒暑感を用いた間接的受容である。Mixed 方式の各主観申告による熱的不快率を確認したところ、受容感と我慢感の範囲はほぼ同等であることが明らかとなった。適応によって熱ストレスに折り合いをつける受容と、忍耐する我慢の意味合いが結果に反映された。また、熱的快適感、

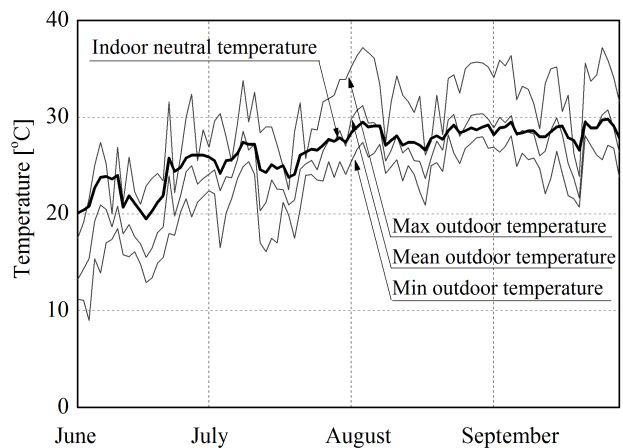
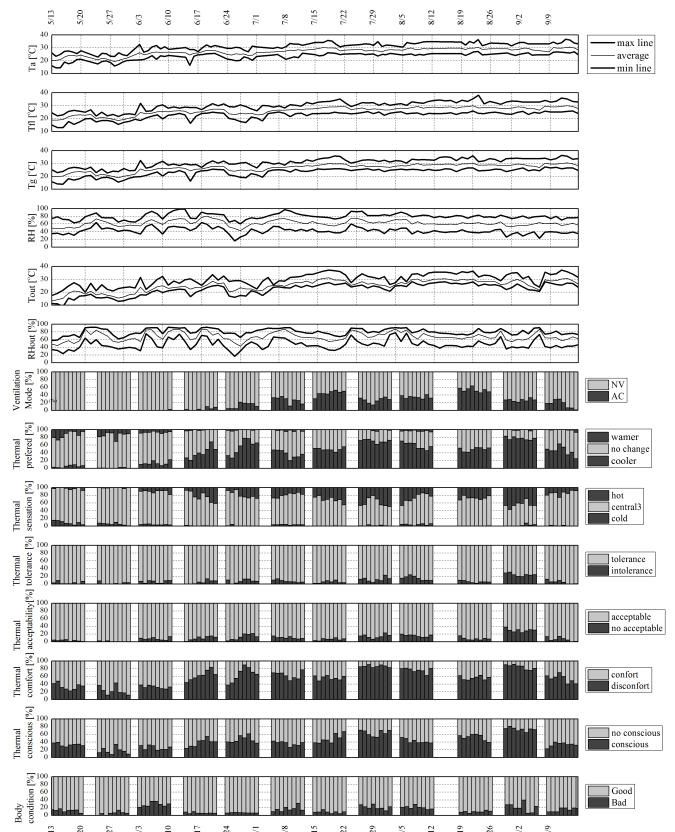


図 4 時系列変化

他の主観申告と比較し、不快率が高い。これらと比較してみたところ、非受容率 20%の状態では、不快率約 80%であり、非我慢率 20%では非受容率同様に不快率が約 80%に達した。このことより、受容や我慢は、熱ストレスを包含した状態であることが確認できた。

各主観申告の熱的不快率が最小となる Tdiff は、全てマイナス側に偏っていた。これは中立温度よりも温度が低い状態である。今回、寒暑感尺度から涼しい、という熱的快適性を示す用語を除去して、言語による影響に配慮した。しかし複数の主観申告で、夏期においては中立温度よりも低い側を好む傾向が明らかとなった。

Mixed 方式の申告数は 8703 件であり、そのうち空調設備使用時の申告数は 2059 件であり、Mixed 方式の 24%が

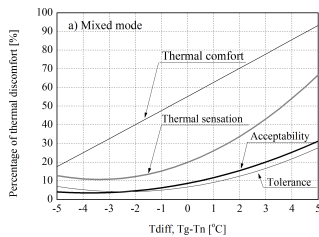


図5 Tdiffと各主観申告  
不快率(Mixed方式)

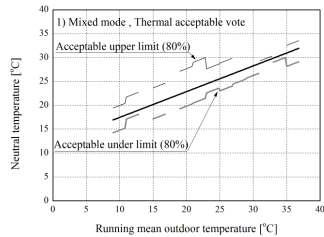


図6 直接的受容による  
受容限界(Mixed方式)

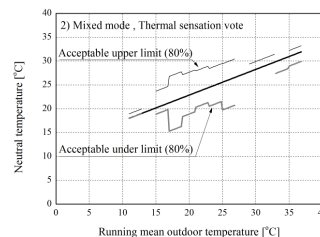


図7 間接的受容による受  
容限界(Mixed方式)

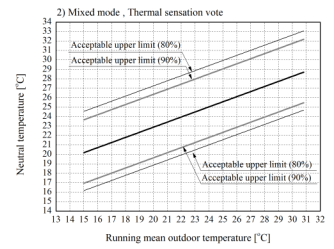


図11 適応モデル  
(Mixed方式)

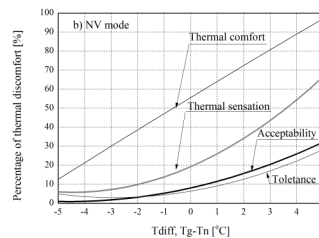


図8 Tdiffと各主観申告  
不快率(FR方式)

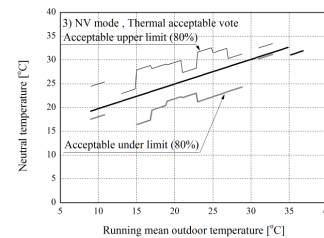


図9 直接的受容による  
受容限界(FR方式)

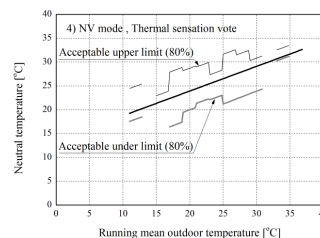


図10 間接的受容による  
受容限界(FR方式)

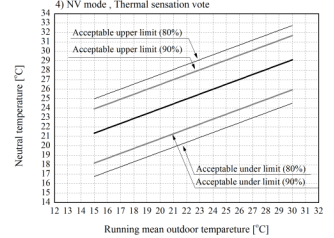


図12 適応モデル  
(FR方式)

空調方式である。冷房時は、運転開始後の過渡的反應により、過度の熱的快適が生じる。そこで、Mixed方式から、冷房時の申告を取り除き、FR方式の申告を抽出した。図8にTdiffと不快率の関係、図9は受容感を用いた直接的受容、図10は寒暑感を用いた間接的受容である。

Mixed方式の線形回帰式は、

$$T_c = 0.54 \cdot T_{out} + 12.1$$

Mixed方式の受容限界幅は、直接的受容で6.6°C(80%)、4.8°C(90%)、間接的受容で8.4°C(80%)、6.7°C(90%)であった。

一方、FR方式の線形回帰式は、

$$T_c = 0.52 \cdot T_{out} + 13.6$$

FR方式の受容限界幅は直接的受容で6.5°C(80%)、4.6°C(90%)、間接的受容で8.2°C(80%)、5.7°C(90%)であった。

図11及び図12にMixed方式とFR方式の熱的快適性の適応モデルを示す。既往の基準と比較すると、90%受容限界の幅は、ASHRAE基準<sup>5)</sup>で7°C(80%)、5°C(90%)、EN基準<sup>6)</sup>で6°C(80%)、4°C(90%)である。直接的受容で比較すると基準と同等の結果であった。

空調方式間で顕著な差が確認されたのは、回帰式の切片であり、回帰係数や受容限界の幅に、差は確認できなかった。Mixed方式の中立温度は、FR方式の中立温度より、約1.5°C恒温側に移動した。これは、Mixed方式中のACによる影響と考えられる。日本の温暖地において、夏季のACは、間欠運転である。熱的不快が閾値に達した段階で、ACを短時間作動する。運転前後の温熱環境の比較、ステップチェンジによる過渡的反應などにより、強い熱的快適感を得る可能性がある。

主観申告による熱的受容限界幅は、直接的受容より間接的受容の方が2°C程度広がった。寒暑感が温熱環境に対

する身体的評価であるのに対し、熱的快適性は「温熱環境に満足を表明する心の状態」と定義されるように、温熱感覚と独立して取り扱われる。既往研究では、PMVに代表されるように寒暑感による間接的受容が一般的である。しかし実態調査では、心理的適応や嗜好により、中立性(中立の時に熱的快適感が最大)や受容の定義(Central3の妥当性)を実態調査のデータに基づき、検討する必要がある。本報では、検討不十分である為、両申告による熱的受容の結果を示した。

#### 4. まとめ

岐阜の住宅を対象に実態調査を行い、熱的快適性の適応モデルを検討した。外部環境の変化に対し、室内環境や空調方式、そして主観申告に影響することが示された。また受容限界幅を実態調査データに基づいて算出し、地域や期間は限定されているが、熱的快適性の適応モデルを求めた。

#### 参考文献

- 1) IPCC 地球温暖化第四次レポート, 中央法規, 2008
- 2) 中谷ら: 日本建築学会環境系論集, 597, pp.51-56, 2005
- 3) 飛田ら: 日本建築学会環境系論集, 614, pp.71-77, 2007
- 4) Griffiths, I: Report to the Commission of the European Communities. EN 3S-090UK: University of Surrey Guildford, 1990
- 5) ASHRAE 55-2010, 2010
- 6) EN15251

\*岐阜工業高等専門学校建築学科

\*\*東京都市大学

\*Gifu National College of Technology

\*\*Tokyo City University