住宅における熱的快適性と寒冷ストレスに関する研究

冬期の長野県長野市を対象として

STUDY ON THERMAL COMFORT AND COLD STRESS IN HOUSES

For Nagano city in Nagano prefecture in winter

堀江 真太郎^{*1}, 中谷 岳 史^{*2}, リジャル H.B.^{*3}, 高木 直 樹^{*4}*Shintaro HORIE, Takashi NAKAYA, H.B. RIJAL
and Naoki TAKAGI*

The purpose of this study was to conduct a winter indoor thermal environment measurement and a subjective thermal comfort survey on detached houses in Nagano City. In addition, we estimated the neutral temperature and acceptable temperature range from the obtained data and explored the incidence of cold stress. The neutral temperature calculated using Griffiths' method was 18.0 °C and regression analysis was 21.5 °C in operative temperature. The lower limit of the acceptable range was 6.6 °C. Occupants adapted strongly to the indoor environment. However, care must be taken because occupants also accepted the cold stress environment.

Keywords : Thermal comfort, Neutral temperature, Thermal acceptability, Houses, Cold stress, Field survey

熱的快適性, 中立温度, 受容範囲, 住宅, 寒冷ストレス, 実測調査

1. 背景・目的

室内温熱環境の設計制御に際して、熱的快適性の追及が求められる。熱的快適性とは「その温熱環境に満足を示す心の状態」¹⁾と定義されている。従来の室内における熱的快適性は、建築や設備によって居住者に提供されるものとして計画されている。熱的快適性に関する研究は数多く行われており、その知見を基とした ASHRAE standard 55²⁾ や、EN15251³⁾ の予測温冷感指標 (PMV) ⁴⁾ 又は Adaptive model による評価が広く参照されてきた。PMV から得られる熱的中立温度は、温熱環境 6 要素 (室温、湿度、平均放射温度、気流、代謝量、着衣量) を変数として算出でき、年齢、性別、季節、人種等の 2 次要因の影響は小さいとされている⁴⁻⁷⁾。PMV や標準新有効温度 (SET*) といった温熱環境指標は、厳密に温熱環境制御がされた実験室での研究から導出されたものであり、人間は環境に対して受動的な発熱体として扱われている。

しかし、これらの指標から求められる中立温度を現実環境で適用することは疑問視されており、実生活において人間は自身の温熱環境を能動的に調整し熱的快適性を得る、という環境適応の概念⁸⁾が示されている。環境適応には、居住者が温熱環境を制御する行動的適応の他に、居住者が温熱環境を受容する心理的適応⁹⁾が挙げられる。これらの適応行為により、人は様々な温熱環境に対応できると

考えられている。de Dear ら¹⁰⁾による、全館空調方式ビルと、自然通風ビルの熱的快適性比較では、全館空調方式ビルの受容範囲は PMV で予測された中立範囲と一致するのに対し、自然通風ビルではより広い温度範囲となっていた。適応を考慮した熱的快適性の検討には、実環境での実測調査が不可欠である。特に住宅では空調の制御権が居住者に委ねられており、適応手段が多様であるため他の建築と比べて幅広い温度範囲を受容すると期待される。

一方、適応による受容範囲の拡張にも限界があると考えられる。低温環境での生活は、不快感や健康被害といった寒冷ストレス¹¹⁾を受ける恐れがある。WHO¹²⁾や英国保健省¹³⁾では 18°C を健康に影響のない最低室内温度として、室温をそれ以上に保つことを推奨している。居住者が寒冷ストレスを知覚し回避行動をとらない場合、注意が必要である。

日本の住宅における温熱環境に関する研究は数多く行われており、長野県の住宅を対象に実測調査を行った加藤ら¹⁴⁾の研究では、冬期の室内温度は 5°C~20°C と広い温度での生活が確認された。中立温度と受容範囲に着目した研究は、関西¹⁵⁻¹⁷⁾、岐阜¹⁸⁾、関東¹⁹⁻²⁰⁾で行われているが準寒冷地を対象とした研究は見られない。中村ら²²⁾による調査では環境適応の地域差が報告されているため、準寒冷地の中立温度と受容範囲のデータを蓄積し、居住者が寒冷ストレス環

^{*1} 日本郵政㈱ 修士 (工学)^{*2} 信州大学工学部建築学科 助教・博士 (農学)^{*3} 東京都市大学環境学部環境創生学科 教授・博士 (工学)^{*4} 信州大学工学部建築学科 名誉教授・博士 (工学)

Japan Post Holdings Co., Ltd., M.Eng.

Assist. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr.Agr.

Prof., Faculty of Environmental Studies, Dept. of Restoration Ecology & Built Environment, Tokyo City Univ., Dr.Eng.

Emer. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr.Eng.

境をどのように認識しているのか調査する必要がある。また、近年在宅勤務の普及により住宅内での生活時間が増加している中、住宅における環境適応データを蓄積することで、省エネ化や生産性向上を目指した住宅環境の設計・管理指針の整理が期待される。

本研究では、準寒冷地である長野県長野市の戸建て住宅を対象に、冬期室内温熱環境の実測調査と主観申告調査を行い、中立温度と受容範囲を求め、寒冷ストレス環境での生活について考察を行う。

2. 調査概要

2.1 調査対象

本研究は、準寒冷地である長野県長野市（省エネルギー地域区分：4地域、Köppenの気候区分²³⁾：Cfa）の戸建住宅と居住者を対象に行った。対象住宅は、木造戸建住宅13戸（築年数5~64年）である。Fig. 1に築年数10年毎の分布を示す。対象住宅の築年数にばらつきがみられるが、本研究では、説明変数として室内温熱環境の計測データを選択し主観申告と計測値の関連から分析を行う。住宅の築年数や断熱性、構法、住まい方等は熱収支の結果として室内温熱環境に反映されるため、調査に対する影響は小さいと考えられる。調査に協力した居住者は対象住宅に住む男性17名、女性15名の計32名。年齢は16~80歳であった。居住者の身長と体重については、個人性の高い要素であるため、居住者の心理的負担を軽減する目的で

Fig. 1 Building age of target.

Table 1 Specification of measurement.

Parameter	Instrument	Resolution	Accuracy	Manufacture
t_a [°C]	Thermo recorder	0.1°C	±0.5°C	T&D Corporation
RH [%]	TR-72wf	1%	±5%	
t_g [°C]	Thermo recorder	0.1°C	±0.3°C	
t_v [°C]	TR-71ui			
V [m/s]	Climomaster Anemometer 6501 Series	0.01m/s	±2%	Kanomax

Fig. 2 Type of posture.

性別と年齢を基に日本人の平均値²⁴⁾から導出した。調査期間は2018年11月25日~2019年1月16日、各住宅1週間程度の測定を行った。測定項目は、室内温熱環境と主観申告である。

2.2 調査方法

室内温熱環境の測定は、環境側要因 (t_a :空気温度[°C]、RH:相対湿度[%]、 t_g :黒球温度[°C]、V:風速[m/s]) の4項目、人体側要因 (I_{cl} :着衣量[clo]、Met:代謝量[met]) の2項目の測定を行った。環境側要因の測定機器として、温湿度は携帯型温湿度データロガー (T&D, Thermo recorder TR-72wf)、黒球温度は携帯型温度データロガー (T&D, Thermo recorder TR-71ui) と黒球温度計 (Sibata, ϕ =150mm)、風速は風速計 (Kanomax, Climomaster Anemometer 6501 Series) を使用した。Table 1に各測定機器の概要を示す。

本研究は人を対象としたものであるため、ヘルシンキ宣言²⁵⁾に則り、居住者から同意を得て行った。

測定機器は居住者が主に滞在する部屋で日射や発熱の影響を受けず、生活に支障のない場所へ設置した。測定高さは上下温度差による主観申告への影響と、座位様式による頭部位置の違いを考慮し、床座住宅の場合は床上0.7m、椅子座住宅の場合は床上1.1mに設定して測定を行った。また床上0.1mの空気温度 (t_v :足元温度[°C]) 測定を行った。本研究の測定水準はclass IIに該当する⁹⁾。測定間隔は5分である。人体側要因の測定は主観申告回答時、居住者自身が記入した。代謝量は、申告直前の活動内容についての自由記述²⁶⁾と5段階の作業強度¹⁾から推定した。着衣量については、居住者が回答した着衣重量から花田の重量法²⁷⁾を用いて算出した。

主観申告調査は、室内温熱環境の実測調査期間中の1日最大4回まで、居住者が測定機器を設置した部屋に滞在しているときに居住者自身が申告用紙に記入した。申告時間は任意であるが、非定常状態の影響を低減するため帰宅後、食後、入浴後には30分以上、また回答後は1時間以上の時間を置いてから回答するよう依頼した。

居住者の基本情報として、年齢、性別、申告時の体調を申告させた。住宅内における適応行動の一つとして、姿勢を変えることによる人体の放受熱量の調整が挙げられる。本研究では姿勢による影響

Table 2 Types of subjective vote.

Question	Scale
Attribute	age, gender, physical condition
Date & Time	date, time
Metabolic rates	free description & 1:standing work, 2:light standing work, 3:sitting work, 4:seated quiet, 5:reclining
Clothes	weight of clothes [g]
Postures	1:standing, 2:chair sitting, 3:seiza sitting, 4:cross-legged sitting, 5:sideway sitting, 6:both-knees-erect sitting, 7:leg-out sitting, 8:lateral, 9:supine
Room status	windows, door, curtain, humidifier, dehumidifier, air conditioner, stove, kotatsu, hot carpet, heating pad, free description
Thermal conscious	1:unconscious, 2:conscious
Thermal acceptability	1:unacceptable, 2:acceptable
Personal tolerance	1:intolerable, 2:tolerable
Thermal preference	1:cooler, 2:no change, 3:warmer
Affective assessment	1:extremely uncomfortable, 2:very uncomfortable, 3:uncomfortable, 4:slightly uncomfortable, 5:comfortable
Thermal sensation	-3:very cold, -2:cold, -1:slightly cold, 0:neutral, 1:slightly hot, 2:hot, 3:very hot
Skin moisture	1:not at all, 2:slightly, 3:moderately, 4:profusely

を加味し、作用温度の算出を行う。姿勢は9種類（立位、椅子座位、正座位、胡坐座位、横座位、立膝位、投げ足座位、側臥位、仰臥位）の中から、申告直前の姿勢に最も近い姿勢を選択してもらった。Fig. 2に各姿勢を示す。姿勢の定義、図は蔵澄ら²⁸⁾に従った。

室内の状況は窓、ドア、カーテンの開閉、加湿器、除湿器の使用有無、暖房器具（エアコン、ストーブ）、採暖器具（こたつ、ホットカーペット、かいり）、その他暖房・採暖器具の使用有無について記述してもらった。

主観申告の内容は7項目（室温意識、熱的受容感、熱的我慢感、熱的選好感、熱的快適感、寒暑感、発汗感）である。主観申告尺度はISO10551²⁹⁾と日本建築学会環境基準³⁰⁾に基づき設定した。各申告は尺度値1から始まる順序尺度とし、寒暑感のみ尺度値-3から始まるものとした。主観申告の項目及び尺度と尺度値をTable 2に示す。日本語での質問方法として、室温意識は室内温熱環境を意識して生活していたか2段階（1:意識していなかった、2:意識していた）で質問した。熱的受容感は室内温熱環境を受け入れられるか2段階（1:受け入れられない、2:受け入れられる）で質問した。熱的我慢感は室内温熱環境を耐えられるか2段階（1:耐えられない、2:耐えられる）で質問した。熱的選好感は室内温熱環境をどのように変えたいか3段階（1:より涼しく、2:今のままでよい、3:より暖かく）で質問した。熱的快適感は室内温熱環境がどの程度快適か5段階（1:耐えられない、2:非常に不快、3:不快、4:やや不快、5:快適）で質問した。寒暑感は室内温熱環境をどのように感じているか7段階（-3:非常に寒い、-2:寒い、-1:やや寒い、0:暑くも寒くもない、5:やや暑い、6:暑い、7:非常に暑い）で質問した。発汗感は居住者自身の発汗の程度について4段階（1:発汗なし、2:やや汗ばむ、3:汗ばむ、4:非常に汗ばむ）で質問した。

2.3 温熱指標

本研究で算出する温熱指標は予測温冷感申告(PMV [-])、予測不快者率 (PPD [%]) 新有効温度(ET* [°C])、標準新有効温度(SET* [°C])、作用温度 (Top [°C]) である。

PMV と PPD は ISO7730³¹⁾、ET*はASHRAE thermal comfort tool³²⁾、SET*はASHRAE standard 55-2017¹⁾に準じた。PMVの算出には空気温度、相対湿度、平均放射温度 (MRT)、風速、着衣量、代謝量を用いる。ET*、SET*ではさらに、大気圧、体重、体表面積を用いた。MRTは、Bentonの式³³⁾に基づいて算出した。大気圧は、気象庁³⁴⁾より長野県長野市のデータを用いた。体重は厚生労働省²³⁾、

Fig. 3 Daily outdoor temperature in Nagano city. (Max.: maximum, Min.: minimum.)

体表面積は蔵澄式³⁵⁾を用いて算出した。

作用温度は蔵澄らによる姿勢別の有効放射面積率²⁸⁾及び、人体の対流熱伝達率の算出式³⁶⁾を用いて算出した。作用温度及び、放射熱伝達率の算出方法はASHRAE Handbook-Fundamentals⁴⁾に準じた。

3. 結果・考察

3.1 室内温熱環境の集計結果

Fig. 3に測定期間中の外気温 (t_{out} [°C]) を示す。外気温は長野県長野市の地方気象台データ³⁴⁾を用いた。測定期間中の外気温は最高22.0°C、最低-9.5°C、平均2.5°Cであり非常に寒冷な気候であった。英国保健省¹³⁾は、平均外気温が4~8°Cを下回ると死亡リスクが増加すると提唱しており、本研究の実測期間はそれ以下の値であった。

本研究の調査対象住宅の空調方式は、居住者の任意により空調制御を行う混合方式 (Mixed mode, MM) である。本研究では暖房 (エ

Table 3 Summary of thermal environment data.

	Mode	n	Mean	S.D.	Min.	Max.	Mid.
t _a [°C]	MM	641	17.8	3.6	6.0	27.1	17.9
	HT	430	18.6	3.6	6.0	27.1	18.9
	FR	211	16.2	3.2	7.4	22.2	16.1
MRT [°C]	MM	641	17.1	3.8	5.9	25.0	16.5
	HT	430	17.6	3.7	7.1	25.0	17.0
	FR	211	16.0	3.5	5.9	24.1	15.4
HR [g/kg(DA)]	MM	641	6.6	1.5	3.2	12.0	6.6
	HT	430	6.6	1.6	3.2	12.0	6.6
	FR	211	6.6	1.3	3.5	10.4	6.8
V [m/s]	MM	641	0.02	0.01	0.00	0.06	0.02
	HT	430	0.02	0.02	0.00	0.06	0.02
	FR	211	0.02	0.01	0.01	0.06	0.02
I _{cl} [clo]	MM	641	0.92	0.39	0.28	2.75	0.85
	HT	430	0.93	0.40	0.28	2.75	0.84
	FR	211	0.92	0.37	0.29	2.18	0.86
Met [met]	MM	641	1.6	0.7	0.8	7.5	1.5
	HT	430	1.5	0.6	0.8	5.0	1.5
	FR	211	1.6	0.8	0.9	7.5	1.0
Δt _{a,v} [°C]	MM	641	2.3	2.8	-4.5	10.1	1.6
	HT	430	3.0	3.0	-4.5	10.1	3.3
	FR	211	1.1	1.8	-3.8	7.5	0.8
t _{out} [°C]	MM	640	2.8	4.0	-9.2	20.1	2.6
	HT	429	1.9	3.7	-9.2	14.0	1.5
	FR	211	4.6	3.9	-4.7	20.1	4.2

(n: number of sample, S.D.: standard deviation, Min.: minimum, Max.: maximum, Mid.: median.)

Table 4 Summary of thermal indices.

	Mode	n	Mean	S.D.	Min.	Max.	Mid.
PMV [-]	MM	641	-0.9	1.8	-7.2	+6.3	-0.6
	HT	430	-0.8	1.7	-7.2	+3.9	-0.5
	FR	211	-1.2	1.9	-5.1	+6.3	-1.0
PPD [%]	MM	641	42.7	35.2	5.0	100.0	30.2
	HT	430	38.6	33.4	5.0	100.0	26.4
ET* [°C]	FR	211	51.0	37.2	5.0	100.0	45.8
	MM	641	17.2	3.4	6.5	25.5	17.1
	HT	430	17.8	3.3	6.6	25.5	17.4
SET* [°C]	FR	211	16.0	3.2	6.5	23.0	16.0
	MM	641	23.6	6.7	6.8	45.1	23.0
	HT	430	23.9	6.5	6.8	40.5	23.5
Top [°C]	FR	211	22.9	7.2	10.2	45.1	21.6
	MM	641	17.4	3.5	6.5	25.8	17.2
	HT	430	18.0	3.4	6.5	25.8	17.7
	FR	211	16.1	3.3	6.5	23.4	16.0

(n: number of sample, S.D.: standard deviation, Min.: minimum, Max.: maximum, Mid.: median.)

エアコン、ストーブ) 使用時を HT モード (Heating mode, HT)、暖房非使用時を FR モード (Free-running mode, FR) として分類し、その合計を混合方式として集計を行った。

得られた温熱環境測定結果は 26,893 点 (2,241 時間) であった。主観申告数は全申告 641 申告のうち、HT モードの申告数は 430 申告、FR モードの申告数は 211 申告であった。HT モード、FR モードのサンプル数は十分と言えないため、本研究では参考程度に留める。

暖房・採暖器具の申告割合はエアコンが 22.2%、ストーブが 50.9%、こたつが 52.1%、ホットカーペットが 7.8%、かいろが 2.3%、暖房・採暖器具不使用が 12.0%であり、ストーブとこたつの使用が多く見られた。

Table 3 に主観申告時の温熱環境測定の集計結果を示す。上下温度差は申告の 60%が ISO7730³¹⁾ の基準値である 3.0°C 以内であった。暖房時と非暖房時で比較を行うと、室内温度、MRT の平均ではともに HT モードが FR モードよりも高い値を示した。絶対湿度、着衣量、代謝量の平均では差が見られなかった。

Table 4 に温熱指標の算出結果を示す。混合方式における PMV の平均は中立範囲から寒冷側に外れていた。PPD の平均は推奨である 10%を上回る値であった。暖房時と非暖房時で比較を行うと、PMV の平均は HT モードが FR モードよりも中立寄りであった。ET*、SET*、作用温度の平均においてどの指標も HT モードが FR モードよりも高い値であった。

PMV の適用範囲は -2.0 から +2.0 まで³¹⁾とされている。適用範囲から外れた申告の割合は寒冷側が 23.9%、暑熱側が 0.9%であった。SET*の快適範囲は 22.2°C から 25.6°C とされており¹¹⁾、本研究の

平均 SET*は快適範囲内であった。作用温度と ET*の値が近いことから体感温度に対する湿度や発汗の影響は小さいと考えられる。

申告の過半を超えるこたつ等の採暖器具について、使用時の温熱感覚への影響は渡邊ら³⁷⁾によって示されており、こたつ使用時の作用温度算出方法も示されている。しかしその算出には床面の断熱性能による伝導の熱損失などが影響するが、今回の調査結果では床の断熱性能など不確定な要素が多いため算出しなかった。そのため本研究で算出する温熱指標には、採暖器具の影響は加味されていないものとする。

3.2 主観申告調査の集計結果

Table 5 に主観申告調査の集計結果を示す。集計を行う上で熱的快適感と寒暑感の再コーディングを行った。熱的快適感は尺度値 1~4 の不快申告、尺度値 5 の快適申告の 2 分類とした。寒暑感 (TSV) は TSV=-3,-2 の寒冷申告、TSV=-1,0,1 の中立申告(中央 3 尺度, central 3)、TSV=2,3 の暑熱申告の 3 分類とした。申告数は HT モードが 430 申告、FR モードが 211 申告の合計 641 申告であった。

主観申告の結果について暖房時と非暖房時で比較を行うと、室温意識の意識申告は HT モードが FR モードよりも高い値であった。熱的受容感、熱的我慢感、熱的選好感、熱的快適感、寒暑感、発汗感には差が見られなかった。

室温意識の割合は低く、居住者の約 70%が温熱環境を意識せずに生活していた。暖房の有無に関わらず、居住者の約 90%が温熱環境を受容していた。一方で、温熱環境を不快と感じている割合は 20%以上であり、より暖かい環境を好む傾向が見られた。発汗感の発汗申告は少ないため、熱的快適性に対する発汗の影響は小さいと考え

Table 5 Summary of subjective votes.

	Mode	n	Percentage [%]			
			conscious		unconscious	
Thermal conscious	MM	641	30.7		69.3	
	HT	430	34.2		65.8	
	FR	211	23.7		76.3	
Thermal acceptability			acceptable		unacceptable	
	MM	641	92.8		7.2	
	HT	430	92.3		7.7	
	FR	211	93.8		6.2	
Personal tolerance			tolerable		intolerable	
	MM	641	93.0		7.0	
	HT	430	92.1		7.9	
	FR	211	94.8		5.2	
Thermal preference			cooler	no change	warmer	
	MM	641	0.5	69.9	29.6	
	HT	430	0.7	69.5	29.8	
	FR	211	0.0	70.6	29.4	
Affective assessment			comfortable		uncomfortable	
	MM	641	66.1		33.9	
	HT	430	66.5		33.5	
	FR	211	65.4		34.6	
Thermal sensation			cold	central 3	hot	
	MM	641	5.5	94.1	0.5	
	HT	430	6.5	92.8	0.7	
	FR	211	3.3	96.7	0.0	
Skin moisture			not at all	slightly	moderately	profusely
	MM	641	96.9	2.8	0.3	0.0
	HT	430	96.0	3.5	0.5	0.0
	FR	211	98.6	1.4	0.0	0.0

(n: number of sample.)

Fig. 4 Distribution of operative temperature from 6:00 to 22:00. (n: number of sample, S.D.: standard deviation, SK.: skewness, KU.: kurtosis.)

Fig. 5 Distribution of operative temperature from 6:00 to 22:00 on the Psychrometric Chart.

られる。

3.3 居住環境

WHO¹²⁾では18°Cを健康的の維持に必要な最低気温と定めている。英国保健省¹³⁾では健康に対する低温環境の影響をまとめており、適切な着衣量かつ安静時の室内温度の推奨を18°C以上として、18°C未満で心血管疾患リスクの増加、16°C未満では呼吸器系疾患リスク増加、5°C以下では低体温症といった寒冷ストレスを受ける恐れがあると述べている。本研究では今後18°C、16°C、5°Cを、寒冷ストレス警戒ラインとして考察を行う。また、国内の混合方式住宅では、居住者が空調制御を行うことが一般的である。温熱環境が危険領域に達した場合、居住者は適応行為により温熱環境を安全領域に戻すと考えられる。そこで本節では、居住者が生活活動を行う時間（6時～22時）を対象として温熱環境を調査する。

Fig. 4に実測期間中、6時～22時における作用温度0.5°C毎のヒストグラムを示す。やや低温側に裾を引いているが正規分布に近い分布であった。分布の割合を見ると全データ18,035点中、5°C以下は0.2%、5°C以上～16°C未満は43.6%、16°C以上～18°C未満は21.8%、18°C以上は34.4%であり、65%以上が健康被害の恐れがある18°C未満であった。

Fig. 5に、6時～22時の温湿度と、PMVから算出した受容範囲を加えた空気線図を示す。PMVに基づく受容範囲はPMV=-0.5～+0.5の範囲とし、算出にはTable3の平均値（Ta=MRT、V=0.02m/s、Icl=0.92clo、Met=1.6met）を本研究の標準的な温熱環境要因と仮定し使用した。PMVに基づく受容範囲は15.2°C～23.2°Cであった。ASHRAEstandard55-2017¹⁾のGraphic Comfort Zoneと比較すると、本研究の受容範囲は代謝量が高いため低温側にずれていた。受

容範囲内のデータ数は54.9%、受容範囲より寒冷側は38.7%、暑熱側は6.5%であった。実測データは主に受容範囲から低温側にかけて分布しており、Fig. 4の最頻値17.5°CがFig. 5の受容範囲内に存在することから、居住者は温熱環境を熱的快適性に基づいて制御していたと考えられる。但しPMVに基づく受容範囲に18°C等Top線と16°C等Top線の一部が含まれており、PMVにより受容と判定されても、寒冷ストレスに暴露される恐れがある。また、PMVに基づく受容範囲より低温の環境に38.7%が滞在していた。着衣量や代謝量、採暖などの熱環境適応によって低温環境を受容していたと思われる。しかし健康に問題が生じる可能性がある温度水準であり、熱的快適性や省エネルギーに加えて、健康の観点から最低室温を別途設定することが望ましい。

3.4 温熱知覚

居住者はどのように温熱環境を認識しているのか、主観申告結果と主観申告時の実測データを用いて検討を行う。

Fig. 6に寒暑感のヒストグラムを示す。各尺度の申告数は、TSV=-3が0.2%、TSV=-2が5.3%、TSV=-1が26.8%、TSV=0が62.9%、TSV=1が4.4%、TSV=2が0.5%、TSV=3が0.0%であった。居住者の多くが中立又はやや寒いと感じていた。

Table 6 Probit analysis results of thermal sensation.

Equation	Mean	S.D.	R ²	p	S.E.
$P(<=-3)=0.151Top-0.70$	-4.7	6.6	0.17	$p<0.05$	0.014
$P(<=-2)=0.151Top+0.79$	5.2				
$P(<=-1)=0.151Top+2.10$	13.9				
$P(<=-0)=0.151Top+4.47$	29.6				
$P(<=-1)=0.151Top+5.48$	36.3				

S.D.: standard deviation, n: number of sample, R²: Cox and Snell R², S.E.: Standard error of the regression coefficient.

Fig. 6 Distribution of thermal sensation vote.

Fig. 7 Box plot of thermal sensation vote by operative temperature.

Fig. 8 Percentage of thermal sensation vote against operative temperature.

Fig. 9 Distribution of Thermal Sensation Votes from Fanger³⁾.

Fig. 7 に寒暑感申告別の箱ひげ図を示す。TSV=-3,2,3 は申告数が少ないため、考察から除外する。中央値で比較をすると、TSV=-2 では 13.7°C、TSV=-1 では 15.4°C、TSV=0 では 17.7°C、TSV=1 では 19.5°C であり、作用温度が上がるに連れて寒暑感申告も暑熱側の回答となる傾向が見られた。TSV=0 は 10.1~25.8°C の範囲に分布していた。他の尺度も同様に、広い温度範囲に分布していた。

作用温度に対する寒暑感の申告率を推定するため、寒暑感申告を目的変数、作用温度を説明変数としてプロビット分析を行った。Table 6 に分析結果、Fig. 8 に申告率を示す。横軸範囲は、Table 4 の作用温度範囲 (6.5~25.8°C) とした。申告率が最大となる点は、TSV=-1 では 9.6°C の時に 48.9%、TSV=0 では 21.8°C の時に 76.4% であり、その他の尺度では外挿となるため、算出しなかった。作用温度が上がるに連れて暑熱側の申告率が高くなる傾向が見られた。

Fig. 9 に Fanger³⁾の実験室における温冷感申告率と温度の関係を示す。本研究と同様に各尺度が広範囲に分布している。実験室実験では着衣量や代謝量等は同一条件に統一されるため、申告の分布は個人差によるものである。したがって、本研究の寒暑感申告の分布も個人差の影響を受けているものと考えられる。

Fig. 8 と Fig. 9 を比較する。Fanger の実験は着衣量を 0.6clo、代謝量は安静状態で行われた。本研究の平均実測値は着衣量が 0.92clo、代謝量が 1.6met であるため、申告の分布が低温側へずれるのは妥当である。しかしそれを踏まえても本研究の方が TSV=0 の範囲が

Table 7 Mean operative temperature for thermal preference and thermal sensation vote.

Mode	Top [°C]					
	Thermal preference (no change)			Thermal sensation (neutral)		
	n	Mean	S.D.	n	Mean	S.D.
MM	448	18.0	3.2	403	18.3	3.0
HT	291	18.5	3.0	264	18.5	3.0
FR	157	17.1	3.3	139	17.7	3.0

(n: number of sample, S.D.: standard deviation.)

Table 8 Neutral temperature estimated by regression analysis.

	Mode	Equation	R ²	p	S.E.	T _n [°C]
ta	MM	TSV=0.083Top-1.80	0.20	p<0.05	0.007	21.7
tg	MM	TSV=0.074Top-1.61	0.15	p<0.05	0.007	21.8
ET*	MM	TSV=0.088Top-1.83	0.19	p<0.05	0.007	20.8
SET*	MM	TSV=0.011Top-0.58	0.01	p<0.05	0.004	(52.7)
Top	MM	TSV=0.080Top-1.72	0.17	p<0.05	0.007	21.5
	HT	TSV=0.085Top-1.84	0.16	p<0.05	0.009	21.6
	FR	TSV=0.080Top-1.63	0.26	p<0.05	0.009	20.4

S.D.: standard deviation, R²: Cox and Snell R², S.E.: Standard error of the regression coefficient.

Fig. 10 Relation between the thermal sensation vote and operative temperature.

広く、申告率も高かった。この違いは居住者の着衣の選択や代謝量の違いといった温熱環境への適応行動によるものと考えられる。

居住者は居住環境の大半を中立と感じていたと考えられる。中立申告が広く分布していたことから、適応が強力に働いていたといえる。一方で寒冷ストレス警戒ライン 18°C を下回っても、中立申告の割合が高いままであった。そのため、居住者が健康リスクのある環境を知覚せずに生活している恐れがある。

3.5 中立温度

中立温度の推定手法として回帰法、Griffiths 法、さらに寒暑感や選好感の中立申告時の平均値を用いる方法が挙げられる³⁸⁾。本研究では、手法毎の中立温度推定値を比較する。

Table 7 に熱的選好感の現状維持申告時と、寒暑感の TSV=0 申告時の作用温度を示す。作用温度の平均値は熱的選好感が 18.0°C、寒暑感が 18.3°C であった。

回帰法は寒暑感申告と室温の回帰係数から中立温度を算出する。Table 8 に回帰分析の結果、Fig. 10 に混合方式、HT モード、FR モードにおける寒暑感申告と作用温度の関係を示す。SET* の中立温度は 52.7°C と算出されたが、Table 4 の最大値を上回るため算出値から除くこととする。

Griffiths 法はあらかじめ回帰係数 (勾配) を仮定し、寒暑感申告と中立値の差から中立温度を推定する。算出式を (1) に示す。Griffiths 法によって算出される中立温度は、寒暑感申告の変化率である勾配の影響を受ける。本研究では既往研究に基づき、勾配の値として 0.25、0.33、0.50 の 3 種類を採用した。Table 9 に Griffiths 法を用いた中立温度の推定結果を示す。本研究では空気温度と黒球温度、ET*、SET*、作用温度を説明変数として用いた。使用した勾配による算出値の差は 0.3~0.7°C であり、測定誤差を考慮すると勾配毎の差はないと考えられる。そのため、既往研究で用いられることの多い勾配 0.50 の値を採用する。算出された中立温度について暖房時と非暖房時で比較を行うと、全ての説明変数において FR モードよりも HT モードが高い値であった。

各手法で推定された中立温度を比較すると、寒冷感の TSV=0 申告時の平均値と Griffiths 法が近い値であった。これは TSV=0 の申告率が高いためであると考えられる。回帰法は他の手法と比べて高い値であった。Fig. 6 より、本研究の寒暑感申告は中立から寒冷側

$$T_n = T_i - \frac{TSV - TSV_n}{\text{Slope}} \quad (1)$$

T_n: 中立温度 [°C], T_i: 室内温度 [°C], Slope: 勾配 [-],

TSV: 寒暑感申告 [-], TSV_n: 寒暑感申告の中立値(TSV=0) [-].

Table 9 Neutral temperature estimated by Griffiths method.

	Mode	T _n [°C]				
		t _a	t _g	ET*	SET*	Top
Slope=0.25	MM	19.1	18.5	18.5	24.9	18.7
	HT	19.7	18.9	18.9	25.8	19.1
	FR	17.8	17.7	17.7	23.0	17.7
Slope=0.33	MM	18.8	18.2	18.2	24.6	18.3
	HT	19.4	18.6	18.6	25.5	18.8
	FR	17.5	17.4	17.4	22.7	17.4
Slope=0.50	MM	18.4	17.9	17.8	24.2	18.0
	HT	19.0	18.2	18.2	25.2	18.4
	FR	17.2	17.1	17.1	22.4	17.1

に集中しているため、回帰式の切片と傾きが小さくなったことが原因であると考えられる。

本研究のように短期間の計測では寒暑感申告の偏りから回帰法の傾きが小さくなることがある。また適応の影響を考慮すると回帰法の使用には注意が必要である³⁸⁾。Griffiths法の勾配についても勾配値0.50の有用性が示される³⁹⁾一方で、勾配値0.50の普遍的な使用について疑問が示されている⁴⁰⁾。これらの理由から中立温度の推定方法は優劣がついておらず、既往研究では研究毎に適宜選択されている。本研究では今後の検討のため、Griffiths法と回帰法の推定値を併記する。

Table 10 に既往研究において、冬期の住宅を対象に推定された中

Table 10 Comparison of winter neutral temperature of dwelling with other studies.

Country	Method	t_{mout} [°C]	T_n [°C]				
			t_a	t_g	ET*	SET*	Top
This study	GM.	2.5	18.4	17.9	17.8	24.2	18.0
	RA.		21.7	21.8	20.8	-	21.5
Japan ¹⁵⁾ (Kansai)	-	-1~11	-	13~24	-	-	-
Japan ¹⁶⁾ (Kansai)	RA.	-	-	9.9	10.9	-	10.9
Japan ¹⁷⁾ (Kansai)	RA.	-	16.3	15.1	16.3	19.2	16.1
Japan ¹⁸⁾ (Gifu)	GM.	-	15.6	-	-	-	-
Japan ¹⁹⁾ (Kanto)	RA.	-	20.7	-	-	-	-
Japan ²⁰⁾ (Kanto)	GM.	-	16.1	-	-	-	-
Japan ²¹⁾ (Kanto)	GM.	-	17.6	-	-	-	-
Nepal ⁴¹⁾	GM.	11.3	-	16.2	-	-	-
		10.1	-	15.2	-	-	-
		11.9	-	24.2	-	-	-
		11.8	-	18.0	-	-	-
Nepal ⁴²⁾	GM.	3.1	-	13.4	-	-	-
		-2.4	-	10.7	-	-	-
		20.1	25.1	-	-	-	-
		14.4	22.6	-	-	-	-
Pakistan ⁴³⁾	GM.	13.3	20.9	-	-	-	-
		6.0	20.2	-	-	-	-
		8.0	19.8	-	-	-	-
		16.3	26.0	-	-	-	-
India ⁴⁴⁾	RA.	14.5	28.9	-	-	-	-
		13.7	22.2	-	-	-	-
India ⁴⁵⁾	RA.	14.2	-	-	-	-	18.1
	RA.	7.9	-	-	-	-	15.6
UK ⁴⁶⁾	RA.	12.1	-	-	-	-	17.0
UK ⁴⁷⁾	GM.	3.1	19.4	-	-	-	-
China ⁴⁸⁾	RA.	1.7	19.3	-	-	-	-
China ⁴⁹⁾	RA.	5.7	12.8	-	-	-	-
China ⁵⁰⁾	RA.	9.6	21.0	-	-	-	-
China ⁵¹⁾	RA.	-19.7	-	-	-	-	19.5
		-2.3	-	-	-	-	20.8
		5.9	-	-	-	-	18.2
		15.3	-	-	-	-	19.7
China ⁵²⁾	RA.	2.4	-	-	-	-	15.8
China ⁵³⁾	RA.	-	-	-	-	-	12.9
China ⁵⁴⁾	RA.	-	-	-	-	-	14.5
China ⁵⁵⁾	RA.	4.4~26.7	-	-	-	-	14.0
China ⁵⁶⁾	RA.	-	-	-	-	-	11.5
China ⁵⁶⁾	RA.	-	-	-	-	-	21.5
Iran ⁵⁷⁾	RA.	-	20.8	-	-	-	-

(GM.: Griffiths method, RA.: regression analysis.)

立温度と期間中の平均外気温度 (t_{mout} [°C]) 示す。既往研究では主に回帰法または Griffiths 法が使用されていた。既往研究での中立温度は 9.9~28.9°C に分布していた。説明変数には、空気温度、作用温度、黒球温度の順に使用されることが多く、ET*は 2 例、SET*は 1 例のみであった。

日本の既往研究と比較して本研究の中立温度は同水準であり、温暖地域と準寒冷地との差は確認できなかった。中立温度が最も低いのは、関西¹⁶⁾の $t_g=9.9^\circ\text{C}$ であった。これは中立から暑熱側に集中した温冷感申告に対して回帰法で中立温度を算出しているため、切片が大きく、傾きが小さい回帰式となったことが原因だと考えられる。

Fig. 11 に中立温度と平均外気温度の関係を示す。プロットデータは Table 10 より平均外気温度と中立温度が取れるものを用いた。また、平均外気温度が 0°C を下回るサンプル数は少ないため、回帰曲線の算出には使用しなかった。本研究の平均外気温度と中立温度の関係は既往研究と同水準であった。また、回帰曲線より中立温度と平均外気温度には正の相関が確認できた。しかし外気温度が低温になると、回帰曲線の傾きも緩やかになる傾向が確認された。

既往研究でも中立温度と外気温には正の相関が確認されている。Fig. 12 に Humphreys⁵⁸⁾による中立温度と月平均気温の関係を示す。自然通風ビルでは線形に近い関係であるのに対し、冷暖房ビルではより複雑な関係である。

Fig. 11 と Fig. 12 を比較すると、冬期の住宅における中立温度と平均外気温度の関係は、冷暖房ビルに近いものであった。一方で住宅の中立温度分布は Humphreys のものよりも低温まで及んでいた。混合方式の住宅における空調の制御権は居住者にあり、居住者は自

Fig. 11 Relation between neutral temperature and outdoor temperature.

(GM.: Griffiths method, RA.: regression analysis.)

Fig. 12 The change in comfort temperature with monthly mean outdoor temperature from Humphreys⁵⁸⁾.

然通風や冷暖房等を使い分けて生活を行う。外気温度が低温になると暖房の使用率が高くなるため、中立温度と外気温度の関係が空調建物に近いものになったと考えられる。しかし住宅ではオフィスビルと違い、居住者の好みや意識に合わせて適宜暖房を使用するため、適応がより強力に働いていると考えられる。

3.6 受容範囲

ASHARAE standard 55 では、熱的に受容可能な環境を、居住者の80%が許容できる温熱環境と定義している。本研究では受容感の申告率が80%を超える範囲を受容範囲として扱う。また、PMVの中立範囲はPPDが10%以内の範囲である。ASHRAEのAdaptive model¹⁾では受容率が80%、90%の範囲にラインが引かれている。そのため受容率が90%の範囲にも着目する。

受容率を推定するため、温度と受容感の関係を分析した。受容感を目的変数、温度を説明変数としてプロビット分析を行い、申告率が80%以上の範囲を受容範囲とした。説明変数は中立温度と同様に、空気温度、黒球温度、ET*、SET*、作用温度を用いた。

Table 11 に分析結果、Table 12 に本研究で推定された受容範囲と、既往研究において冬期データを含み住宅を対象に推定された受容範囲を示す。本研究では受容範囲の上限は推定できなかった。SET*は有意水準（5%）を満たさなかった。

Table 11 Probit analysis results of thermal acceptability.

Equation	Mean	S.D.	R ²	p	S.E.
t_a $P(<=1)=-0.062t_a+0.4$	6.6	16.1	0.02	$p<0.05$	0.352
t_g $P(<=1)=-0.057t_g-0.51$	-8.4	17.5	0.01	$p<0.05$	0.359
ET* $P(<=1)=-0.061ET^*-0.45$	-7.5	16.5	0.01	$p<0.05$	0.372
SET* $P(<=1)=-0.018SET^*-1.05$	-17.3	55.7	0.00	0.116	0.270
Top $P(<=1)=-0.061Top-0.44$	-7.3	16.5	0.01	$p<0.05$	0.022

S.D.: standard deviation, R²: Cox and Snell R², S.E.: Standard error of the regression coefficient.

Table 12 Comparison of acceptable range with other studies.

Country	Range [%]	Acceptable range [°C]				
		t_a	t_g	ET*	SET*	Top
This study	80	7.0~	6.4~	6.5~	-	6.6~
	90	14.1~	14.1~	13.7~	-	13.9~
Japan ¹⁹⁾ (Kanto)	80	20.1~29.6	-	-	-	-
	50	15.8~30.7	-	-	20.9~31.6	-
	90	18.8~22.7	-	-	-	-
China ⁴⁸⁾	80	13.3~	-	-	-	-
China ⁴⁹⁾	80	12.8~15.7	-	-	-	-
China ⁵⁶⁾	80	-	-	-	-	18.0~25.5
Iran ⁵⁷⁾	75	16.8~24.7	-	-	-	-
	90	18.8~22.7	-	-	-	-

Table 13 Probit analysis results of other subjective votes.

	Equation	Mean	S.D.	R ²	p	S.E.
Thermal conscious	P(<=1)=-0.043Top-0.24	5.5	-23.3	0.01	p<0.05	0.015
Personal tolerance	P(<=1)=-0.081Top-0.13	-0.6	12.4	0.02	p<0.05	0.022
Thermal preference	P(<=1)=-0.121Top-4.91	40.7	-8.3	0.09	p<0.05	0.016
	P(<=2)=-0.121Top-1.52	12.6				
Affective assessment	P(<=1)=0.114Top-0.78	-6.9	8.8	0.10	p<0.05	0.000
	P(<=2)=0.114Top-0.30	-2.6				
	P(<=3)=0.114Top+0.23	2.0				
	P(<=4)=0.114Top+1.53	13.4				
Skin moisture	P(<=1)=0.058Top+2.91	50.1	17.3	0.00	0.052	0.000
	P(<=2)=0.058Top+3.80	65.5				

S.D.: standard deviation, n: number of sample, R²: Cox and Snell R², S.E.: Standard error of the regression coefficient.

Table 3、Table 4 より、受容範囲は実測の最小値付近を下限とした。また既往研究と比較して、本研究の受容範囲の下限は最も低温であった。

得られた受容範囲は非常に広範囲であり、居住者は居住環境の大半を受容可能であることから、居住者は低温環境に強く適応していると考えられる。

その他の主観申告に対しても受容感と同様に、作用温度を説明変数としてプロビット分析を行った。寒暑感の分析結果を Table 6、受容感の分析結果を Table 11、その他の分析結果を Table 13 に示す。発汗感は無意味水準を満たさなかった。

混合方式における各主観申告の申告率を Fig. 13 に示す。室温意識は、作用温度が低下するにつれて上昇する傾向が見られた。受容感の受容申告は 6.6°C 以上で 80%、13.9°C 以上で 90%の受容率、我慢感の我慢可能申告は 9.9°C 以上で 80%、15.3°C 以上で 90%の受容率であった。選好感の現状維持申告は 19.8°C 以上で 80%、24.6°C 以上で 90%の受容率、快適感の快適申告は 20.9°C 以上で 80%、24.7°C 以上で 90%の受容率であった。寒暑感の中央 3 尺度は 10.9°C 以上で 80%、13.8°C 以上 27.7°C 以下で 90%の受容率であった。

低温環境では不快と感じる割合が上昇し、室温意識が増加するため居住者は寒冷ストレスを知覚していると考えられる。さらに選好感の受容率も下がることから、寒冷ストレスに対する回避行動を取ると考えられる。一方で我慢感の受容率は低温環境でも高いままであり、居住者は寒いことを知覚しながらも我慢して生活を続ける可能性もある。

Fig. 13 Percentage of each subjective votes for given operative temperature.

4 結論

準寒冷地である長野県長野市の戸建て住宅を対象に、冬期室内温熱環境の実測調査と主観申告調査を行い、中立温度、受容範囲を推定し、寒冷ストレス環境での生活について考察を行った。得られた知見を以下に示す。

1. 調査期間の平均外気温度は、 2.5°C であった。作用温度は最低 6.5°C 、最高 25.8°C 、平均は 17.4°C であった。
2. 主観申告調査より、居住者の室温意識は低く、居住者の約 70%が温熱環境を意識せずに生活していた。居住者の約 90%が温熱環境を受容していたが、約 30%は不快と感じより暖かい環境を好んでいた。
3. 居住者は生活活動に合わせ、温熱環境が中立となるように制御する傾向が確認されたが、大半が寒冷ストレスを受ける環境で生活していた。
4. 推定された混合方式時の中立温度は、回帰法では空気温度が 21.7°C 、黒球温度が 21.8°C 、 ET^* が 20.8°C 、作用温度が 21.5°C 。Griffith 法では空気温度が 18.4°C 、黒球温度が 17.9°C 、 ET^* が 17.8°C 、 SET^* が 24.2°C 、作用温度が 18.0°C であった。
5. 受容範囲の下限は、空気温度が 7.0°C 、黒球温度が 6.4°C 、 ET^* が 6.5°C 、作用温度が 6.6°C であった。
6. 低温環境では不快申告率が上昇し、室温意識も上がることから、居住者は寒冷ストレス環境を認識していた。一方で我慢感申告から算出した受容率は高いままであった。

居住者は主に推定された中立温度付近で生活していたこと、受容範囲が非常に広範囲であることから、居住者は低温環境に良く適応していたといえる。一方で寒冷ストレス環境を知覚しながらも、我慢できるため回避行動を取らずに生活を続けてしまう場合も確認された。強力な適応は健康被害に繋がる可能性もある。居住者自身が温熱環境を意識し、寒冷ストレス環境の回避を心がける必要がある。

住宅における中立温度や受容範囲を対象にした調査事例はまだ少ない。本研究は冬期の長野市を対象に調査を行ったが、サンプル数が少ないため空調方式については居住者の任意によって空調制御を行う混合方式としての考察のみに留まった。また本研究ではこたつ等の採暖器具の効果について十分に検討していない。しかし低い室温環境に対し幅広い受容範囲を示した理由として、採暖器具の影響は少なからずあると考えられる。今後は空調方式や採暖器具、年齢、季節等の影響を比較検討できるようデータを蓄積し、寒冷ストレス環境における居住者の適応行動について分析する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科学研究費 JP17K12882(代表: 中谷岳史)の助成を受けた。

参考文献

- 1) ASHARE: ANSI/ASHARE Standard55-2017, Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2017.
- 2) Comité Européen de Normalisation Standard EN 15251-2007: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality,

Thermal environment, lighting and acoustics, Brussels, 2007.

- 3) Fanger P.O.: Thermal Comfort. Danish Technical Press, Copenhagen. Republished by McGraw-Hill Book Co., New York, 1970.
- 4) ASHRAE: ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI), Chapter 9, 2013.
- 5) de Dear R.J., Leow K.G., Ameen A.: Thermal comfort in the humid tropics. Part II. Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore, ASHRAE Transactions, 97, pt1, pp.880-886,1991.
- 6) Fukai K., Saito J., Gotoh S. & Ito H.: Experimental Study on Correlation between Standard New Effective Temperature (SET^*) and Japanese Thermal Sensation : Part 1-Analysis of Subjective Judgement in Winter Experiment, Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol. 17, No.48, pp.21-29, 1992.
- 7) Fukai K., Ito H., Gotoh S., Akui S. & Saito J.: Experimental Study on Correlation between Standard New Effective Temperature (SET^*) and Japanese Thermal Sensation : Part 2-Comparison of Thermal Sensation in Winter and Summer Seasons, Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Vol. 18, No.51, pp.139-147, 1993.
- 8) Nicol J.F. & Humphreys M.A.: Thermal comfort as part of a self-regulating system, Building Research and Practice, (J. CIB), 6(3), pp. 191-197, 1973.
- 9) Brager G.S. & de Dear R.J.: Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Buildings, 27(1), pp. 83-96, 1998.
- 10) de Dear R.J. & Brager G.S.: Towards an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, Vol 104 (1), pp. 145-167, 1998.
- 11) Parsons K.: Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, Third Edition, CRC Press, 2014.
- 12) World Health Organization: WHO Housing and health guidelines, 2018.
- 13) Public Health England: Cold weather plan for England: making the case why long-term strategic planning for cold weather is essential to health and wellbeing. 2015.
- 14) Kato T., Yamagishi A. & Yamashita Y.: Investigation of winter indoor thermal environment of detached houses in Nagano city : Difference of the indoor thermal environment and residents' thinking from the point of view of specific heat loss coefficient, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 60, No. 470, pp. 19-27, 1995.4
- 15) Iseki K., Isoda N., Yanase T. & Hanaoka T.: A survey of residential thermal environments. (Part 2). Effect of thermal conditions on the residents. Journal of Home Economics of Japan, Vol. 39, No. 8, pp. 879-884, 1988.
- 16) Tobita, K., Nakaya, T., Matsubara, N., Kurazumi, Y., & Shimada, R.: Calculation of neutral temperature and acceptable range by the field study of houses in kansai area, japan, in winter. Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 614, pp. 71-77. 2007. 4
- 17) Tobita, K., Matsubara, N., Kurazumi, Y., Nakaya, T., & Shimada, R.: Difference of the thermal sensation votes by the scales in the field study of houses during winter, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 74, No. 646, pp. 1291-1297, 2009. 12
- 18) Rijal H.B., Honjo M., Kobayashi R., Nakaya T.: Investigation of comfort temperature, adaptive model and the window-opening behaviour in Japanese houses, Archit. Sci. Rev., 56 (1), pp. 54-69, 2013.
- 19) Matsumoto T., Miyake R., Ishimoto M. & Adachi K.: The study on a thermal acceptable zone of resident in daily life, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 22, No. 51, pp. 597-602, 2016. 6
- 20) Imagawa H., Rijal H.B., & Shukuya M.: Field survey on the comfort temperature and occupant behaviour in bedrooms, Journal of

- Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol 81, No. 728, pp. 875-883, 2016. 10
- 21) Rijal H.B., Humphreys M.A. & Nicol J.F.: Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings. *Energy and Buildings*, Vol. 202, No. 109371, 2019.
 - 22) Nakamura Y. & Okamura K.: Analysis for appearance of seasonal acclimatization in optimum temperature based on some field investigations, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol. 62, No. 495, pp. 85-91, 1997. 5
 - 23) Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon T.A.: Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Science*, 11, 1633-1644, 2007.
 - 24) Ministry of Health, Labor and Welfare: Handbook of Health and Welfare Statistics, Part 2 Health, Chapter 1, Health Table 2-6 Mean height and body weight by sex and age, by year, <https://www.mhlw.go.jp/toukei/youran/indexyk_2_1.html>, (accessed 2019.1.20).
 - 25) World Medical Association: World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects, Adopted by the 18th WMA General Assembly, Helsinki, Finland, 1964, and amended by the 64th WMA General Assembly, Fortaleza, Brazil, 2013.
 - 26) Ainsworth B.E. et al: Compendium of Physical Activities: an update of activity codes and MET intensities, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32 (9 Suppl), pp. 498-504, 2000.
 - 27) Hanada K.: Hihukunonetsuzetsuensei, *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, Vol. 35, No. 8, pp. 358-364. 1982. (in Japanese)
花田嘉代子: 被服の熱絶縁性, 繊維機械学会誌, 第 35 卷, 第 8 号, pp.358-364. 1982.
 - 28) Kurazumi Y., Tsuchikawa T., Matsubara N. & Horikoshi T.: Effect of posture on heat transfer areas of the human body. *Building and Environment*, 43, pp. 1555-1565. 2008.
 - 29) ISO 10551: Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales, Geneva: International Standards Organization, 1995.
 - 30) Architectural Institute of Japan Environmental Standards: Standards for Measurement of Psychological and Physiological Responses to Thermal environments, AIJED-H0001-2014, 6-13, 2014.
 - 31) ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
 - 32) ASHRAE: Thermal Comfort Tool, 1997.
 - 33) Benton C.C. et al: A field measurement system for the study of thermal comfort, *ASHRAE Transactions*, pp. 623-633, 1990.
 - 34) Japan Meteorological Agency: <<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/index.html>>, (accessed 2019.1.20).
 - 35) Kurazumi Y., Horikoshi T., Tsuchikawa T. & Matsubara N.: The body surface area of Japanese, *Jpn. J. Biometeor.*, Vol. 31, No. 1, pp. 5-29, 1994.
 - 36) Kurazumi Y., Tsuchikawa T., Ishii J., Fukacawa K., Yamamoto Y. & Matsubara N.: Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection, *Building and Environment*, 43, pp. 2142-2153. 2008.
 - 37) Watanabe S., Horikoshi T., Miyoshi Y., Miyamoto A. & Mizutani A.: Thermal Effect of Heating Facility Kotatsu on the Human Body in Japanese Style Room, *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, No. 497, pp. 39-45. 1997.7
 - 38) Humphreys M.A., Nicol F. & Roaf S.: Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice, Routledge, 2012.
 - 39) Humphreys M.A., Rijal H.B. & Nicol F.: Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors: new insights and an extended database, *Energy and Buildings*, 63, pp. 40-55, 2013.
 - 40) Rupp R.F., Kim J., Ghisi E. & de Dear R.J.: Thermal sensitivity of occupants in different building typologies: The Griffiths Constant is a Variable, *Energy and Buildings*, 200, pp. 11-20, 2019.
 - 41) Rijal H.B., Yoshida H. & Umemiya N.: Seasonal and regional differences in neutral temperatures in Nepalese traditional vernacular houses, *Building and Environment*, 45 (12) , pp. 2743-2753, 2010.
 - 42) Rijal H.B.: Thermal adaptation of buildings and people in extremely cold climate of Nepal, *Proceedings of the 1st International Conference on Comfort at the Extremes: Energy, Economy and Climate*, pp. 43-59, 2019.
 - 43) Nicol F. & Roaf S.: Pioneering new indoor temperature standards: The Pakistan project. *Energy and Buildings*, 23, pp. 169-174, 1996.
 - 44) Singh M.K., Mahapatra S. & Atreya S.K.: Thermal performance study and evaluation of comfort temperatures in vernacular buildings of North-East India, *Building and Environment*, 45, pp. 320-329, 2010.
 - 45) Thapa S., Bansal A.K. & Panda G.K.: Adaptive thermal comfort in the residential buildings of north east India: an effect of difference in elevation, *Build. Simul.*, 11 (2), pp. 245-267, 2018.
 - 46) Oseland N.A.: A Comparison of the Predicted and Reported Thermal Sensation Vote in Homes during Winter and Summer, *Energy and Buildings*, 21 (1), pp. 45-54, 1995.
 - 47) Rijal H.B., Stevenson F.: Thermal comfort in UK housing to avoid overheating: lessons from a 'zero carbon' case study, *Proceedings of the Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort*, Windsor, UK, 9-11, 2010.
 - 48) Yan H. & Yang L.: Indoor thermal conditions and thermal comfort in residential buildings during the winter in Lhasa, China. 8th Windsor Conference, Windsor UK, pp. 10-13, 2014.
 - 49) Liu Y. et al.: Study on thermal comfort adaptive model of natural ventilated residential buildings in hot-summer and cold-winter area. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology Xi'an, Shaanxi, China 710055, 2007.
 - 50) Liu H., Wu Y., Li B., Cheng Y. & Yao R.: Seasonal variation of thermal sensations in residential buildings in the Hot Summer and Cold Winter zone of China, *Energy and Buildings*, 140, pp. 9-18, 2017.
 - 51) Yan H.Y., Mao Y. & Yang L.: Thermal adaptive models in the residential buildings in different climate zones of Eastern China, *Energy and Buildings*, 141, pp. 28-38, 2017.
 - 52) Xu C., Li S., Zhang X. & Shao S.: Thermal comfort and thermal adaptive behaviours in traditional dwellings: a case study in Nanjing, China, *Building and Environment*, 142, pp. 153-170, 2018.
 - 53) Cheng B., Fu Y., Khoshbakht M., Duan L., Zhang J. & Rashidian S.: Characteristics of thermal comfort conditions in cold rural areas of China: A case study of stone dwellings in a tibetan village, *Buildings*, 8 (4), 49, 2018.
 - 54) Yu W., Li B., Yao R., Wang D., Li K.: A study of thermal comfort in residential buildings on the Tibetan Plateau, China, *Building and Environment*, 119, pp. 71-86, 2017.
 - 55) Han J., Yang W., Zhou J., Zhang G., Zhang Q. & Moschandreas D.J.: A comparative analysis of urban and rural residential thermal comfort under natural ventilation environment, *Energy and Buildings*, 41 (2), pp. 139-145, 2009.
 - 56) Wang Z.J. et al. A field study of the thermal environment in residential buildings in Harbin. *ASHRAE Transactions*, 109(2), pp. 350-355, 2003.
 - 57) Heidari S. & Sharples S.: A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran, *Energy and Buildings*, 34.6, pp. 607-614, 2002.
 - 58) Humphreys M.A.: Outdoor temperatures and comfort indoors, *Building Research and Practice (Journal of CIB)*, 6 (2), pp. 92-105, 1978.

STUDY ON THERMAL COMFORT AND COLD STRESS IN HOUSES

For Nagano city in Nagano prefecture in winter

Shintaro HORIE^{*1}, *Takashi NAKAYA*^{*2}, *H.B. RIJAL*^{*3}
and *Naoki TAKAGI*^{*4}

^{*1} Japan Post Holdings Co., Ltd., M.Eng.

^{*2} Assist. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr.Agr.

^{*3} Prof., Faculty of Environmental Studies, Dept. of Restoration Ecology & Built Environment, Tokyo City Univ., Dr.Eng.

^{*4} Emer. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr.Eng.

In order to create a good thermal environment, it is necessary to consider thermal comfort. The predicted mean vote (PMV) measure is frequently used as a thermal environment index to predict the appropriate neutral temperature. The neutral temperature calculated by PMV is described as a comfort zone in ASHRAE standard 55 and in EN15251.

The PMV measure considers the human body as passive to the environment, but in fact, people do adapt actively to their thermal environment. Generally, people can adapt more readily to housing environments than to office environments. Therefore, the acceptable range of room temperature in a house is wider than the formal comfort zone. Extending the acceptable range for environmental adaptation can lead to energy savings in buildings. Field surveys are needed to estimate the neutral temperature and acceptable temperature range for a house. However, there is a limit to extending the acceptable temperature range, as living in an environment with cold stress can be harmful to human health. The way in which people actually perceive a cold stress environment also needs to be investigated.

The objective of this study was to conduct a winter indoor thermal environment measurement and a subjective thermal comfort survey in detached houses in Nagano City, Japan. In addition, we estimated the neutral temperature and the acceptable temperature range from the obtained data and explored the incidence of cold stress.

The Köppen climate classification of the investigated area is humid subtropical (Cfa). The air conditioning method of the investigated house is Mixed mode. The outside air temperature during the measurement period was -9.5 °C to 22.0 °C, with an average of 2.5 °C. The number of collected votes was 641. The indoor air temperature during the voting was 6.0 °C to 27.1 °C, with an average of 17.8 °C. The thermal environment index calculation based on actual measurement results indicated a slightly cold environment with an average PMV of -0.9 and an average operative temperature of 17.4 °C. According to the results of the subjective thermal comfort survey, approximately 90% of the occupants who voted accepted the thermal environment. However, the percentage of people who were thermal conscious is approximately 30%, and most people live without being aware of the indoor thermal environment. From Fig. 4 and Fig. 5, it is considered that the occupants are adjusting to the thermal environment of the house. However, many occupants lived in cold stressed environments. According to Fig. 6, more than 60% of the votes indicate have a neutral thermal sensation vote. According to Fig. 7, the neutral thermal sensation vote was distributed over a wide range of operative temperatures: 10.1 °C to 25.8 °C. The neutral temperature calculated using Griffiths' method was 18.0 °C and regression analysis was 21.5 °C in operative temperature. The estimated neutral temperatures were comparable to those of previous studies. The lower limit of the acceptable range estimated by probit analysis was 6.6 °C. Although the acceptable range reached very low temperature, it was confirmed that the occupants are more conscious of room temperature and discomfort in cold environments. Therefore, it is considered that occupants do perceive the cold stress environment.

Occupants adapted strongly to the indoor environment. However, care must be taken because occupants also accept cold stress environments.

(2021 年 2 月 16 日原稿受理, 2021 年 10 月 26 日採用決定)