

床暖房時の温熱快適域についての検討

- 戸建住宅における住空間の快適性確保に関する研究 -

(株)ポラス暮らし科学研究所 松本泰輔

日大生産工 松井 勇

1 はじめに

1990年代中頃より、東京近郊の戸建住宅や集合住宅では、新築時の床暖房の採用が増えてきている。床暖房については、さまざまな手法で、その温熱快適域の提案がなされているが、これまでの提案は多くの条件を付随し、統一した範囲をみつけることができない。

2 既往の研究

足裏加熱の暖房効果について検討したこれまでの研究¹⁾²⁾³⁾は、いずれも足裏のみに限定された加熱が全身的な温熱快適性に及ぼす影響は非常に小さいとしている。しかし、足裏加熱の暖房効果は、全身の血行動態によっても大きく異なる。筆者ら⁴⁾⁵⁾⁶⁾は、室温が高くなるにしたがって、足裏加熱により全身温冷感がより暖かい側で評価されることを確認している。堀の研究⁷⁾では、床暖房時の適切な床面温度や室温はいまだに明確にされておらず、設計指針も確立されていないとしている。本研究は、これまでの実験で得た資料をもとに回帰分析をおこない、足裏非加熱時ならびに足裏加熱時の全身温冷感中立範囲としての温熱快適域について検討するものである。

3 本研究の範囲

本研究の範囲を以下に示す。

- 1) 全身温冷感についての主観は、日によって程度が異なるとされているが²⁾、本研究では、1日5回、異なる室温を設定した実験室でおこなった官能検査の結果を用いた。
- 2) 全身温冷感などの主観評価申告値は、実験室入室15分以降に大きな変化はみられず、安定するとされているが⁸⁾、本研



写真1 人工気象室実験風景



写真2 実空間実験風景

究では、入室30分後の申告値を用いた。

- 3) 足裏と床面との接触温度は、加熱床面の仕上げによって異なるとされているが⁹⁾、本研究の官能検査では、現在の新築住宅において高い使用率を示す木質フローリングを加熱床面の仕上げとした。
- 4) 被験者には椅座位安静を指示した。住まい手にとっての温熱環境を評価する場合、椅座時には床上100mm、600mm、1100mmの3つについての環境測定が推奨されているが¹⁰⁾、本研究では、このうち、椅座時腹部高さとなる床上600mmの環境物理量を用いて検討した。

4 官能検査の概要

4-1 実験室

実験は、写真1に示す人工気象室実験と、写真2に示す実空間実験の2つについておこなった。人工気象室実験は、周壁が自由に加熱できる天井高さ2400mmの4畳半実験室でおこなった。実験は、周壁も足裏も加熱しなかった場合(実験1)、周壁を加熱せずに足裏を加熱した場合(実験2)、周壁を35一定に加熱して足裏を加熱しなかった場合(実験3)、周

The design goals of floor heating and its comfort zones
- Research on Realization of Comfortable Habitation Space -

Taisuke MATSUMOTO and Isamu MATSUI

壁を 35℃ 一定に加熱して足裏も加熱した場合(実験 4)の 4 つについておこなった。なお、実験 2 の床面温度は 28℃ 一定とし、実験 3 では加熱床面と被験者の足裏を熱絶縁するために、押出法ポリスチレンフォームを間に挟んだ木質フローリング仕上げの踏み台を被験者の足元に設置した。実空間実験は、エアコンの設置と床暖房の敷設がなされた平均天井高さ 4700mm、広さ約 12 畳のリビングを実験室としておこなった。実験は、敷設した床暖房を運転せずに足裏を加熱しなかった場合(実験 5)、床暖房を運転して足裏を加熱した場合(実験 6)の 2 つについておこなった。床面温度は制御しなかったが、実験 6 では敷設した床暖房の温水マットに 60℃ の温水を 1.5L/min で連続供給した。

4-2 実験手順

図 1 に、実験手順を示す。

実験は、15 分の休憩と 30 分の官能検査を交互に繰り返すものとした。官能検査は、1 日 5 回、それぞれの官能検査ごとに異なる室温を実験室に設定しておこなった。官能検査中、被験者には、計 4 回の全身温冷感についての主観評価を申告させたが、本研究では、心理的反応が定常と思われる実験室入室 30 分後の申告値を用いて検討した。

4-3 被験者

表 1 に、被験者の概要を示す。

実験 1~4 の人工気象室実験は被験者 15 人について、実験 5~6 の実空間実験は被験者 12 人についておこなった。被験者には、全身温冷感についての主観評価を、表 2 に示す 7 段階言語尺度を用いて申告させた。

4-4 測定項目および測器

表 3 に、測定項目および測器を示す。

実験室の環境物理量として温度、相対湿度、黒球温度、風速を実験室中央において 1 分間隔で測定した。

5 結果および考察

5-1 室温と全身温冷感との関係

図 2 に、実験室入室 30 分後のサンプル数 420 の全身温冷感申告を用いて整理した室温と全身温冷感との関係を示す。

室温と全身温冷感との関係から、最小 2 乗法で近似した 1 次直線により求められる全身温冷感中立室温は、足裏非加熱時に 22.9 (相関係数 R:0.88)、足裏加熱時に 19.9 (相関係



図 1 実験手順

表 1 被験者の概要

被験者人数	延べ84人(男性:56人・女性:28人)
平均年齢	27.6±4.4歳(男性:29.4歳・女性:24.2歳)
平均身長	168.5±7.7cm(男性:172.6cm・女性:160.3cm)
平均体重	59.0±9.8kg(男性:64.1kg・女性:48.7kg)
平均着衣量	0.926±0.140clo(男性:0.929clo・女性:0.920clo)
想定代謝量	椅座位安静標準代謝量 58.15W/m ² =1.0Met

表 2 言語尺度 表 3 測定項目および測器

全身温冷感	床面温度,天井面温度, FL+100mm,200mm,300mm, 600mm,1100mm,1500mm…… (C-C熱電対)
暑暖やどや涼寒 いかやちやしい い暖ら涼い かでし いもい ない	温度 相対湿度 黒球温度
+3+2+1 0 -1 -2 -3	FL+600mm (電子式高分子温度センサ) FL+300mm,600mm,1100mm (グローブサーモメータ) FL+300mm,600mm,1100mm (無指向性熱線風速計)
	風速

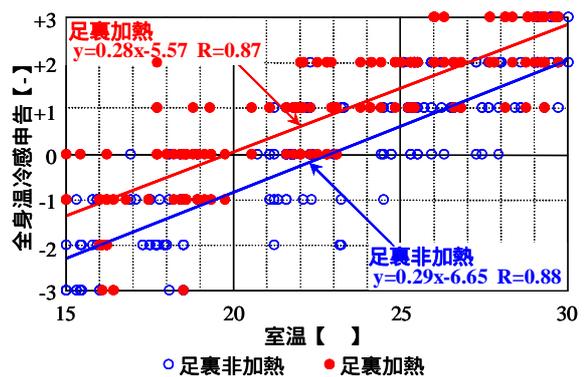


図 2 室温と全身温冷感との関係

数 R:0.87)となっている。

5-2 各環境要素の全身温冷感への影響度

表 4 に、全身温冷感について回帰分析をおこなった結果を示す。なお、回帰分析の目的変数を全身温冷感とし、説明変数を床面温度、室温、平均放射温度(MRT)、床上 100mm~1100mm の上下温度差とした場合の分析結果は危険率 P-値<5.0%で有意となっている。

4 つの説明変数の影響度(t)は、床面温度で 8.29、室温で 9.87、MRT で 2.62、上下温度差で 1.65 と、全身温冷感への影響度は、床面温度と室温で高くなっている。

5-3 全身温冷感中立範囲

図 3 に、回帰分析により求めた全身温冷感中立範囲を示す。なお、全身温冷感中立範囲

は-0.5<(全身温冷感)<+0.5の範囲とし,図中には,実際に得た全身温冷感中立申告についても示している。

全身温冷感中立直線と,全身温冷感中立申告の床面温度と室温の関係から最小2乗法で求めた1次直線との交点は,足裏非加熱時で床面温度 21.5 / 室温 22.4 となり,足裏加熱時で床面温度 29.6 / 室温 19.9 となっている。全身温冷感中立申告の床面温度と室温の関係から求めた1次直線の傾きは,足裏非加熱時と足裏加熱時とで異なっている。これは,足裏非加熱時と足裏加熱時とで,床面温度の全身温冷感への影響が異なることを示すものである。

5.4 床面温度の全身温冷感への影響

図4に,足裏非加熱時と足裏加熱時にわけて求めた全身温冷感中立範囲を示す。なお,全身温冷感中立範囲は,回帰分析の有意水準10%の範囲として示している。

足裏非加熱時と足裏加熱時の,それぞれの全身温冷感中立範囲は,ほとんど床面温度の影響を受けずに,ほぼ一定の室温範囲となっている。また,前項5-3の全身温冷感中立範囲内に,足裏非加熱時と足裏加熱時とで共有する範囲がない。これは,足裏加熱の有無は全身温冷感に有意な影響を及ぼすが,その後の床面温度については,全身温冷感に有意な影響を及ぼさないことを示すものである。

5.5 本研究の有意範囲

図5に,足裏非加熱時と足裏加熱時のそれぞれの全身温冷感中立申告と全身温冷感中立範囲を示す。

足裏非加熱時の全身温冷感中立申告の分布は,ほぼ全身温冷感中立範囲内となっている。しかし,足裏非加熱時では,各室温における床面温度の検討範囲が狭いため,全身温冷感中立範囲も狭くなっている。これに対して,足裏加熱時は,前項4-1のそれぞれの実験条件の違いから床面温度の検討範囲が広く,全身温冷感中立範囲も広がっている。

5.6 床暖房時の温熱快適域

図6に,それぞれの有意水準10%に囲まれた,足裏非加熱時と足裏加熱時の全身温冷感中立範囲を示す。

足裏非加熱時の全身温冷感中立範囲は,横軸に床面温度,縦軸に室温をとった2次元座標上において,(床面温度,室温)で,(20.3, 22.0), (21.7, 21.9), (22.0, 23.5),

回帰統計		分散分析 回帰 残差 合計			
重相関R	0.879	自由度	4	415	419
重決定R ²	0.773	変動	880.553	258.909	1139.442
補正R ²	0.771	分散	220.113	0.647	
標準誤差	0.805	分散比	340.093		
観測数	420	有意F	0.000		

	係数	標準誤差	t(影響度)	P-値
切片	-7.138	0.225	-31.761	0.000
床面温度	0.073	0.009	8.293	0.000
室温 ¹	0.192	0.019	9.867	0.000
MRT ²	0.053	0.020	2.618	0.009
上下温度差 ³	0.073	0.044	1.651	0.100

- 1 室温ならびにMRTは床上600mmの測定値
- 2 $MRT = T_g + 2.37 \times \text{SQRT}(\text{Var}) \times (T_g - T_a)$
Tg:黒球温度 SQRT:平方根 Var:風速 Ta:室温
- 3 上下温度差は床上100mm~1100mmの温度差

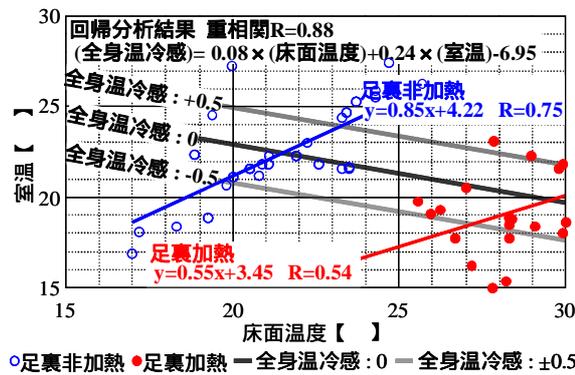


図3 全身温冷感中立範囲

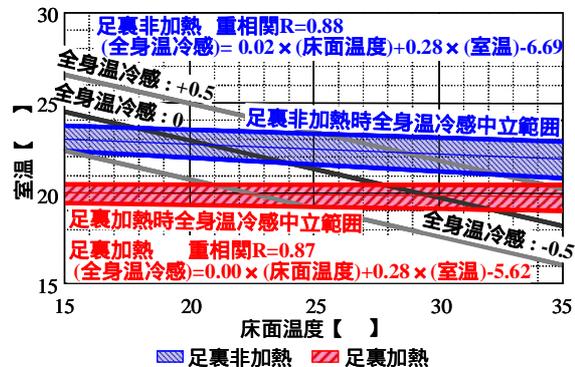


図4 全身温冷感中立時の床面温度の影響

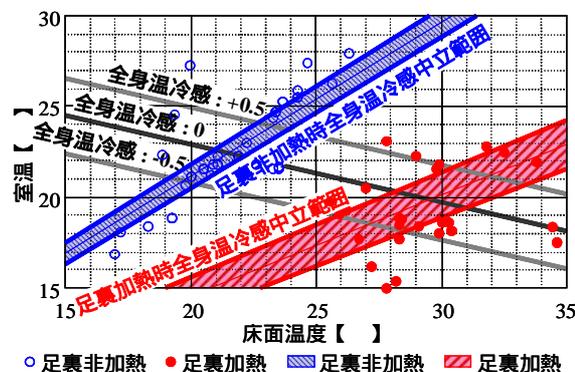


図5 本研究の有意範囲

(23.5, 23.4)の4点に囲まれる。また,足

裏加熱時の全身温冷感中立範囲は、同様に、(26.1, 19.2), (30.7, 19.1), (28.4, 20.5), (33.4, 20.5)の4点に囲まれる。足裏加熱による室温への効果は、足裏非加熱に比して、最小で1.4, 最大で4.4, 平均で2.9と低くなっている。

5-7 考察

図7に、これまでに提案されている床暖房時の温熱快適域と本研究の温熱快適域との対比を示す。なお、図中には、足裏非加熱時の温熱快適域も示している。

本研究の足裏非加熱時の温熱快適域は、おおよそASHRAE Standard 55¹¹⁾の温熱快適域の範囲内にある。これまでの提案は室温範囲が高く、その範囲は、通常時の温熱快適域とほとんどを共用あるいは高くなっている。このような対比は、筆者のような住宅分野で実務として暖房設計に携わる者にとっては、理解しづらい。本研究の温熱快適域には、足裏加熱時と足裏非加熱時で一定の差がある。本研究で提示した全身温冷感中立範囲を床暖房時の温熱快適域として提案したい。

6 まとめ

本研究の結果を以下に要約する。

- 1)室温と全身温冷感との関係から、最小2乗法で近似した1次直線により求められる全身温冷感中立室温は、足裏非加熱時に22.9(相関係数R:0.88),足裏加熱時に19.9(相関係数R:0.87)となる。
- 2)足裏加熱の有無は全身温冷感に有意な影響を及ぼすが、その後の床面温度については、有意な影響を及ぼさない。
- 3)足裏加熱による室温への効果は、足裏非加熱に比して、最小で1.4,最大で4.4,平均で2.9と低くできる。

参考文献

- 1)井上和夫,小林陽太郎,磯田憲生:温熱環境条件としての床温が人体に及ぼす影響に関する実験的研究(裸体・椅座・安静時に足底が連続的に接触する場合),日本建築学会関東支部研究報告集,pp.89~92,1975.07
- 2)永村一雄,斎藤平蔵:床暖房と人体生理および温冷感との関係に関する実験的基礎研究,日本建築学会計画系論文集,第353号,pp.21~31,1985.07
- 3)寺野真明,佐藤康仁,久野覚:足裏加熱が温熱快適性に及ぼす影響とその至適加熱条件に関する検討,日本建築学会計画系論文集,第525号,pp.39~44,1999.11
- 4)松本泰輔,松井勇:足裏局所加熱が全身の血行動態および温冷感に及ぼす影響に関する実験的研究~実験室の温湿度設定にステップ変動を与えた場合について~,日本建築学会環境系論文集,第621号,pp.17~22,2007.11

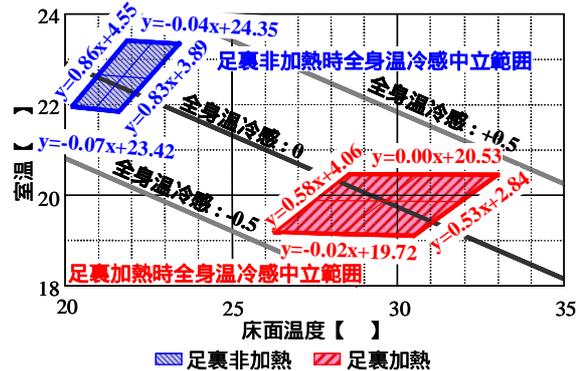


図6 全身温冷感中立範囲としての温熱快適域

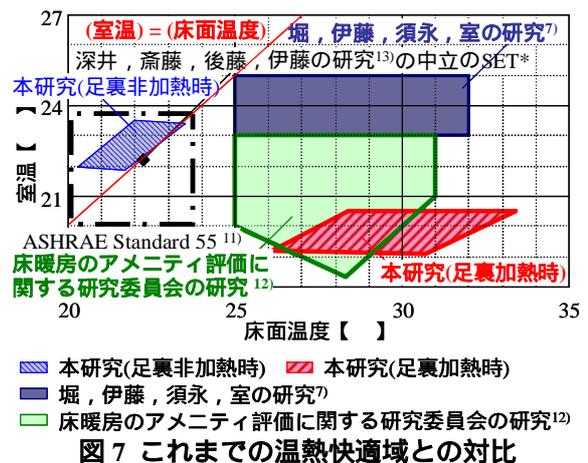


図7 これまでの温熱快適域との対比

- 5)松本泰輔,松井勇:周壁加熱時の足裏加熱が温冷感に及ぼす影響に関する実験的研究~実験室の温湿度設定にステップ変動を与えた場合について~,日本建築学会環境系論文集,第73巻,第628号,pp.721~725,2008.06
- 6)松本泰輔,松井勇:吹抜けを有する冬季実空間における足裏加熱が全身温冷感に及ぼす影響に関する実験的研究~実験室の温度設定にステップ変動を与えた場合について~,日本建築学会環境系論文集,第75巻,第652号,pp.491~497,2010.06
- 7)堀祐治,伊藤直明,須永修通,室恵子:不均一熱環境における熱的快適性の評価に関する研究-床面温度が熱的快適性に及ぼす影響と局部温冷感による熱的快適性予測について-,日本建築学会計画系論文集,第501号,pp.37~44,1997.11
- 8)堀祐治:床暖房評価の課題,日本建築学会環境工学委員会第34回熱シンポジウム「温熱環境の設計・評価法の実用的諸問題」,pp.87~94,2004.12
- 9)松井勇,湯浅昇,沖倉優代,米久田啓貴:各種床仕上材料を用いた暖房床の接触温冷感の評価方法に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第517号,pp.31~37,1999.05
- 10)日本建築学会環境基準 AIJES-H002-2008:室内温熱環境測定基準・同解説,社団法人日本建築学会,pp.26~27,2008.03
- 11)ANSI/ASHRAE Standard 55-2004:Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy,American Society of Heating,Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.,2004
- 12)床暖房のアメニティ評価に関する研究委員会:床暖房のアメニティ評価に関する研究(4)報告書,社団法人空気調和・衛生工学会,p.30,1994.09
- 13)深井一夫,斎藤純司,後藤滋,伊藤宏:標準新有効温度(SET*)と日本人の温熱感覚に関する実験的研究第1報-冬季被験者実験による検討,空気調和・衛生工学会論文集,第48号,pp.21~29,1992.02