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－

THE EFFECT OF LOCAL-HEATING OF SOLES ON FLOW OF BLOOD AND THERMAL-SENSATION OF SUBJECTS

－In the experimental room with step-change throughout hygro-thermal condition－

松本 泰輔*, 松井 勇**

Taisuke MATSUMOTO and Isamu MATSUI

The objective of this paper is to clarify the effect of local-heating of the soles on human physiological and psychological responses. The measurements are carried out in an experimental room with step-change throughout hygro-thermal conditions. The results are as follows;

1. In cold environment, local-heating of the soles has an insignificant effect on thermal sensation.
2. The higher the room temperature is, the more local-heating of the soles has effect on thermal sensation.
3. The neutral temperature of thermal sensation is 22℃ in a normally heated room. However, local-heating of the soles lowers the neutral temperature of thermal sensation to 20℃.

Keywords : thermal environment, floor heating, local-heating, thermal sensation, subject

温熱環境, 床暖房, 局所加熱, 温冷感, 被験者

1.はじめに

省エネルギー問題の社会的認識が高まっている中で、住宅分野におけるエネルギー消費量は漸増傾向を示している。その中でも、暖房用途に使用するエネルギーの割合は給湯用途と並んで非常に高い。これは、住宅の快適性についての住まい手の要求水準も高揚しているためと推察する。

こうした背景のなか、1990年代より急速に普及してきたのが床暖房である。床暖房の体感効果に関しては、筆者¹⁾²⁾³⁾のほかにも様々な分野で高く評価されているが、足裏から供給されている熱が体感に及ぼす影響について検討した報告は少ない。

本研究は、実験室の温湿度制御にステップ変動^{注1)}を与えて行った被験者実験の結果から、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ついて検討したものである。

実験は、①生理量を把握するための特定被験者1名による皮膚温度、皮膚熱流および血流量についての実験、および②心理量として被験者15名による温冷感、快適感についての実験の2つを行った。

2.既往の研究

足裏の局所加熱が体感としての温冷感に及ぼす影響に関する既往の研究は非常に少ない。

井上、小林、磯田⁴⁾が行った裸体青年男性2名の被験者実験は、室温を30℃一定とし、床面温度を15℃、20℃、25℃、30℃、35℃、40℃と非加熱の場合の7通りについて行っている。実験時間は95分とし、被験者は実験開始15分前に入室するように計画されたこの実験では、床面温度による全身温冷感への影響が2名のうち1名にはややみられるが、もう1名にはみられなかったとし、床面温度の体幹部皮膚温度および平均皮膚温度への影響はないと報告している。

永村と斉藤⁵⁾は鉄筋コンクリート造の実空間において、8名の男性に足裏局所加熱を与えたときの生理応答、心理応答を測定している。実験は、市販のスリッパ型足温器を改造したものと電気カーベットを用い、11月から12月にかけてコンベクタ(送風機なし)によって室温を18℃～22℃に保った実空間において、床面温度を42℃～44℃、33℃～34℃と非加熱の3通りを設定した場合について行っている。実験開始45分前に入室し、温熱環境に順化している被験者に対して、実験開始より徐々に足裏を加熱していったこの実験でも、足裏を加熱しても温冷感の明確な改善は認められないという解釈が示されている。

寺野、佐藤、久野⁶⁾が行った男性8名の被験者実験では、室温を19℃一定とし、床面温度に約20℃、25℃、30℃、35℃のステップ変動を与えたときの心理応答を測定している。15分の官能検査と20

* ㈱ボラス暮らし科学研究所 住環境G 主任・修士(工学)

** 日本大学生産工学部建築工学科 教授・工博

CE, Living Environmental R&D Gr., POLUS R&D Center of Life-Style Inc., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., College of Industrial Technology,
Nihon Univ., Dr. Eng.

分の待機を交互に繰り返し、2時間30分で終了するよう計画されたこの実験でも、足裏に限定され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されている。

このように、既往の研究は、室温を一定として床面温度を変えて実験を行ったものである。本研究は、床面温度を29℃一定とし、実験室の温湿度にステップ変動を与えたときの足裏局所加熱による体感効果について検討したものである。

3. 本研究の範囲

実験室の温湿度にステップ変動を与えたときの足裏局所加熱による体感効果を検討するにあたり、実験計画の過程と重要と思われる前提条件を以下に示す。

- 1) 官能検査では、被験者の長時間の拘束が生理応答、心理応答に大きく影響するものと考え、実験室の温湿度制御には、あえてステップ変動を与え、休憩を含む所要時間3時間30分の計画を立てた。
- 2) ステップ変動の方向によって生理の順化速度は異なる⁷⁾といわれているが、本研究では寒冷環境から暑熱環境へと室温が高くなる方向を設定した。
- 3) 足裏と床面との接触温度は加熱床面の仕上によって異なるが、ここでは、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面仕上として採用した。
- 4) 全身温冷感への影響が大きい基礎代謝⁸⁾には年齢差が存在する⁹⁾といわれているが、ここでは20歳から35歳の男女を対象とした。
- 5) 生理量の実験は2006年6月10日～7月10日、心理量の実験は2006年6月10日～8月10日の期間で行った。

4. 実験の概要

4-1. 実験室

被験者実験には、写真1に示す(株)ボラス暮らし科学研究所内にある人工環境室内の天井高2400mmの4畳半実験室を使用した。

4-2. 実験室の温湿度設定

実験室の室温は、図1に示すように15℃、18℃、22℃、26℃、30℃の5段階とした。各室温における湿度は、絶対湿度として5g/kg(DA)一定を設定し、相対湿度はSonntagの式より算出した。

4-3. 実験床

足裏を局所加熱するために、写真2に示すような実験床(910mm×910mm 総厚120mm)を作成し、実験室中央に設置した。なお、実験床の仕上は木質フローリングとし、床面温度は各室温とも29℃一定となるように調節した。

4-4. 実験室の制御状況

被験者実験代表日の室内の制御状況を図2に示す。

室内空気は一樣に拡散しているため、実験室内室温定常となる14:00・14:45・15:30・16:15・17:00における測定値では、ISO7730¹⁰⁾で規定する床上100mmから1100mmまでの上下の室温較差は図3に示すように1℃以内と極めて小さかった。

実験は2ヶ月にわたって行っており、その間の外気の変動も実験室には影響する。このため同一条件で実験を開始するために3時間程度、室温10℃で空調をmanual制御し、その後、13:00より15℃・47.3%RHから始まるprogram制御に切り替えた。

実験床には、放射による人体に及ぼす影響を軽減するため、裏面

写真1 実験場所

図1 実験室の温湿度設定および実験手順

写真2 実験床

図2 実験室の制御状況

図3 実験室内の定常時における高さ方向の温度

をアルミニウムテープで養生した木質フローリングを実験室中央に100mmの高さをもって、写真3のように設置した。床面温度の制御はサーモスタットによるon・off制御である。

また、ひとつの実験条件が終了した後、次の実験条件の温湿度に調整するための時間は15分とした。

4-5. 測定項目と測器

生理量、心理量および実験室の環境物理量としての測定項目および測器を表1に示す。

生理量として皮膚温度・皮膚熱流・上肢末梢血流量を1分間隔で測定した。心理量として部位別温冷感・全身温冷感・接触温冷感・快適感を入室直後・10分後・20分後・30分後に測定した。実験室の環境物理量として室温・相対湿度・黒球温度・風速を1分間隔で測定した。

5. 生理量の把握

5-1. 実験概要

生理量の実験は、心理量を検討するにあたり、足裏加熱時と非加熱時の生理量の違いを比較するために、参考として被験者1名について計5回行った。ここでは5回全ての平均集計結果を提示する。

被験者は、身長183cm、体重58.6kg、年齢32歳の男性で、実験室内では写真4に示すように椅座位安静を保っており、活動強度は1.0Met相当、着衣量は0.59cloであった。

皮膚温度・皮膚熱流の測定点は、Ramanathanの人体外殻層温度測定4点法¹⁾測定部位である下腿・大腿・胸部・上腕に、床面と接する足裏、手の甲を加えた6点とした。血流量の測定は左手中指先で行った。温度計、熱流計および血流計は、衣服による被覆の有無にかかわらず、全て皮膚に直接装着した。

実験では被験者に休憩を与えず、足裏を常に床面に接触させた姿勢を保持させた。なお、このとき、足裏の皮膚温度は32℃一定となるようにした。

5-2. 実験結果および考察

(1) 皮膚温度

図4は足裏を加熱しない場合の人体各部位の皮膚温度の経時変化を示したものである。

皮膚温度は胸部で最も高く、体幹から遠ざかるほど低くなっている。下肢を比較した場合は、常に大腿、下腿、足裏という順に皮膚温度が低くなっていることがわかる。

図5は足裏を加熱した場合の人体各部位の皮膚温度の経時変化を示したものである。

足裏を加熱しない場合には、上腕の皮膚温度と大腿の皮膚温度が同程度で推移するのに対し、足裏を加熱した場合では、上腕の皮膚温度は大腿の皮膚温度に比べて若干高くなっている。これは足裏の局所加熱による血液循環に及ぼす影響が、上腕まで達していることを示すものである。

(2) 血流量

足裏局所加熱が左手中指先の血流に及ぼす影響を図6に示す。

室温15℃、18℃では、足裏加熱の有無による上肢末梢血流量の較差はほとんどみられないが、室温が22℃を超えると、室温の上昇に伴い、足裏局所加熱によって血流量が増加していることがわかる。

(3) 皮膚表層の熱収支

皮膚表層の熱流量変動を図7、図8に示す。

写真3 官能検査風景

写真4 生理量把握実験風景

表1 測定項目と測器

生理量	皮膚温度	胸部・上腕・大腿・下腿・足裏・手の甲
	皮膚熱流	測器: 低熱流用センサー(京都電子工業)
	血流量	左手中指 測器: レーザードップラー血流計(アドバンス)
心理量	温冷感	言語尺度申告表を用いた主観評価
	接触温冷感	申告表: 表3を参照のこと
	快適感	
環境物理量	室温	FL+100mm・+200mm・+300mm・+600mm +1100mm・+1800mm・+2000mm 床面温度・壁面温度・天井面温度 測器: C-C熱電対(江藤電気)
	相対湿度	FL+600mm 測器: サーマレコーダ(エスバック)
	黒球温度	FL+300mm・+600mm・+1100mm 測器: グローブサーモメータ(柴田化学)
	風速	FL+300mm・+600mm・+1100mm 測器: 無指向性熱線風速計(日本カノマックス)
	記録	測器: サーマダックF(江藤電気)

図4 皮膚温度変動(足裏非加熱)

図5 皮膚温度変動(足裏加熱)

図6 上肢末梢血流量変動

足裏を加熱しない場合(図7)では、足裏は室温15°Cにおいて接触直後、急激に熱が奪われているが、その後、足を床に接触し続けているため、床面とは放熱も受熱もない平衡状態を保っている。手の甲は室温22°Cを超えると受熱するようになるが、その他の部位では室温15°C~30°Cまで、常に放熱の状態となっている。

これに対し、足裏を加熱した場合(図8)では、足裏の皮膚温度を32°C一定に保ったにもかかわらず受熱量は変化している。これは、血流量の増減に伴う組織内熱伝導率の変化によるものと思われる。

(4) 室温と皮膚温度の関係

室温と皮膚温度の関係を図9に示す。なお、手の甲の縦軸は他の部位と変えて15°C~30°Cで示している。

足裏局所加熱の有無による皮膚温度の較差は下腿、上腕および手の甲にみられるが、大腿および胸部については皮膚温度の較差が小さいことがわかる。

(5) 考察

一般的に室温が皮膚温度より低い場合には、身体各部からは熱が放散されている。放熱量は室温が低いほど大きくなっている。しかし、足裏を局所加熱することによって図6に示したように上肢末梢部では血流量の増加がみられ、さらに図9に示したように下腿、上腕および手の甲の皮膚温度が高くなる。これは接触伝導により床面から足裏へと効率よく熱が伝わるためである。この影響は室温に依存し、室温が15°C、18°Cでは顕著に現れないが、室温が22°C、26°C、30°Cでは足裏加熱による効果が明確に現れている。

6. 心理量の把握

6-1. 実験概要

温冷感・快適感については表2に示す被験者15人を対象に官能検査を行った。実験中は椅座位安静を指示したが、足裏の移動や姿勢などの拘束は特に行わなかった。

被験者には、全身温冷感と下腿・大腿・胸部・上腕の部位別温冷感、足裏の接触温冷感および快適感を表3に示す言語尺度を用いて主観評価させた。実験室の温湿度設定は前項4-2に準ずる。なお、各室温での官能検査の間には、被験者は着衣温冷感中立温度に近い室温22°Cの前室で15分の休憩をとることとした。

6-2. 実験結果および考察

(1) 平均温冷感申告の変動

身体各部の平均温冷感申告値の経時変化について、足裏を加熱し

図7 皮膚熱流量変動(足裏非加熱)

図8 皮膚熱流量変動(足裏加熱)

図9 室温と皮膚温度の関係

表2 被験者内訳

被験者人数	15人(男性:10人・女性:5人)
平均年齢	26.7歳(男性:27.6歳・女性:24.8歳)
平均身長	169.7cm(男性:173.7cm・女性:161.6cm)
平均体重	58.7kg(男性:63.6kg・女性:48.8kg)
平均着衣量	0.931clo(男性:0.943clo・女性:0.909clo)
仮想代謝量	安静椅座位標準代謝量 58.15W/m²=1.0Met

ない場合を図10に、足裏を加熱した場合を図11に示す。

足裏を加熱しない場合は、各室温における身体各部の温冷感申告

表3 主観評価に用いた言語尺度

把握項目	温冷感						接触温冷感						快適感							
言語尺度	暑い	暖かい	やや暖かい	どちらでもない	やや涼しい	涼しい	寒い	暑い	暖かい	やや暖かい	どちらでもない	やや冷たい	冷たい	非常に心地よい	心地よい	やや心地よい	普通	やや不快	不快	非常に不快
評点	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	+3	+2	+1	0	-1	-2	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

値はほぼ同程度の値を示している。足裏を加熱した場合は、各室温とも足裏の温冷感申告値は「+1.やや暖かい」～「+2.暖かい」を示し、入室後30分における全身温冷感および部位別温冷感の申告値は室温が高くなるにしたがって、足裏を加熱しない場合に比して大きくなっている。

(2) 室温と全身温冷感

各室温における入室30分後のサンプル数75の申告値を用いて、室温と全身温冷感との関係を示したものが図12である。

最小2乗法で求めた室温と全身温冷感申告値との1次近似直線は、ともに相関係数0.85以上となっている。足裏を加熱しない場合の温冷感中立が申告される室温が22℃であるのに対し、足裏を加熱した場合は20℃と、温冷感中立温度を2℃も下げている。

全皮膚面積に対する比率が5%も満たない足裏のみの局所加熱によって、全身温冷感中立を申告する室温を2℃も下げるという結果は、非常に大きな体感効果であると考えられる。

(3) 足裏局所加熱の快適感への影響

全身温冷感と同様に、入室30分後の申告値を用いて快適感についての集計結果を示したものが図13(足裏非加熱の場合)、図14(足裏加熱の場合)である。

足裏非加熱時の快適感申告は室温15℃、18℃において「-1.やや不快」で最多となっているが、足裏加熱時には「0.どちらでもない」が最多となっている。同様に足裏加熱による全身温冷感への影響が大きくなる室温22℃、26℃での評価は、足裏加熱によって「+2.心地よい」の申告が多くなっていることがわかる。ただし、室温が30℃となると足裏加熱の有無によらず「-1.やや不快」の評価が多くなっている。

平均全身温冷感申告の標準偏差の変動を図15に示す。

全身温冷感申告値の標準偏差は、足裏加熱・足裏非加熱とも室温15℃、18℃に比べて22℃、26℃、30℃の方が小さくなっている。これは、室温が低い場合の四肢末梢部の冷たさが影響して、全身温冷感申告値のばらつきが大きくなったものと考えられる。また、室温22℃以上では、足裏加熱時の標準偏差は非加熱時よりも小さくなっている。これは、足裏加熱により末梢の皮膚温度が高くなるために全身温冷感申告値のばらつきが小さくなったものと思われる。

(4) 考察

寺野、佐藤、久野⁶⁾は室温19℃一定で、床面温度に20℃～35℃のステップ変動を与えた場合において、足裏局所加熱の全身温冷感への影響を検討し、足裏の局所加熱が全身温冷感に及ぼす影響はほとんどないと述べている。本研究は、床面温度を29℃一定とし、室温に15℃～30℃のステップ変動を与えた場合の足裏加熱の全身温冷感への影響を検討したもので、室温が15℃、18℃と低い場合は、寺

図10 平均温冷感申告の変動(足裏非加熱)

図11 平均温冷感申告の変動(足裏加熱)

図12 室温と全身温冷感との関係

図13 室温に対する快適感評価(足裏非加熱)

図14 室温に対する快適感評価(足裏加熱)

野らの結果と同様に足裏局所加熱が全身温冷感に及ぼす影響は小さいが、室温が22℃以上になると血流量の増加により、足裏に伝導で直に作用する熱の体内への血流運搬が多くなるため、足裏局所加熱の全身温冷感に及ぼす効果が認められたものと推測できる。

井上、小林、磯田による被験者実験⁴⁾は、室温30℃一定とした室内で裸体青年男性2名について、床面温度を15℃、20℃、25℃、30℃、35℃、40℃と設定を変えて足裏局所加熱の全身への影響を検討した。この結果、床面温度による全身温冷感への影響が2名のうち1名にはややみられるが、もう1名にはみられなかったとし、床面温度の体幹部皮膚温度および平均皮膚温度への影響はないと述べている。本研究の生理量の実験でも、足裏局所加熱による体幹部である胸部皮膚温度への影響およびRamanathanの人体外殻層温度測定4点法から求められる平均皮膚温度への影響は小さかった。しかし、15名の男女について行った官能検査では、室温22℃、26℃、30℃では足裏加熱の全身温冷感への影響は明確となっている。着衣をした被験者の身体からの放熱は、裸体に比して抑制されるため、本研究の結果の方が足裏加熱の効果が顕著であったものと考えられる。

永村と斉藤の被験者8名による官能検査⁵⁾は、室温18℃～22℃に保った鉄筋コンクリート造の実空間において、加熱面温度を42℃～44℃、33℃～34℃および非加熱とした場合の全身温冷感への影響を検討し、足裏を加熱しても温冷感の明確な改善は認められないという解釈を示している。この論文では、各被験者の足裏土踏まずの皮膚温度が38℃～39℃となっており、実際の接触部ではこれより高い温度になっていると考えられる。松井の研究¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾では、38℃以上の接触部温度は熱くて触れていられないという温度となっており、このような状況で被験者が全身温冷感を正しく評価することは困難であると思われる。本研究では床面温度が29℃一定で、足裏の接触部温度は約32℃～33℃と高温になっておらず、適度に加熱しているので、被験者の意識が特に足裏に集中することはなく、足裏加熱の体感効果を正しく評価したものと考える。

7. まとめ

本研究の結果を以下に要約する。

- 1)室温が15℃、18℃では、床面温度29℃で足裏を局所加熱することによって、全身温冷感をより暖かいと評価させる効果は期待できないが、不快感を取り除くには有効である。
- 2)室温が22℃、26℃、30℃では、床面温度29℃で足裏を局所加熱することによって、足裏を加熱しない場合と比べて、全身温冷感により暖かいと評価される。
- 3)全身温冷感の中立を申告する室温は、実験結果から補完して求めると床面温度29℃で足裏を局所加熱した場合は約20℃で、これに対し足裏を加熱しない場合は約22℃となり、足裏を局所加熱することによって全身温冷感の中立を申告する室温を低くすることができる。

注

注1)実験室の運転パターンを設定に際し、温度・相対湿度の目標値に経時的・段階的な変化を与えた。

参考文献

- 1)松本泰輔、暖房時の人体生理応答に関する実証的研究、日本建築学会大

図15 平均温冷感申告の標準偏差の変動

会(関東)学術講演梗概集、pp.509-510、2006年

- 2)松本泰輔、野田将樹、松井勇、戸建住宅の吹抜け空間における快適性確保に関する実験的研究～その1 住まい手の温冷感心理に関する検討～、日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集、pp.431-432、2007年
- 3)野田将樹、松本泰輔、松井勇、戸建住宅の吹抜け空間における快適性確保に関する実験的研究～その2 実住宅における温熱環境測定～、日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集、pp.433-444、2007年
- 4)井上和夫、小林陽太郎、磯田憲生、温熱環境条件として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年
- 5)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 No.353、pp.21-31、1985年7月
- 6)寺野真明、佐藤康仁、久野寛、足裏加温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 No.525、pp.39-44、1999年11月
- 7)川島美勝、後藤滋、八木澄夫、環境温度のステップ変化に対する人間の体温調節系の生理応答 温熱環境評価の研究(4)、日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集、pp.411-412、1974年
- 8)岡村圭子、中村泰人、体温調節モデルに基づく人体の季節順化の表現とその数値的検討、日本建築学会計画系論文集 No.495、pp.93-100、1997年5月
- 9)佐々木隆、基礎代謝の面から見た日本人の特質、日本体質医学学会雑誌 No.41、pp.17-23、1977年
- 10)ISO 7730, Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria、International Standards Organization、2005
- 11)Ramanathan, N. L., A new weighting system for mean surface temperature of the human body, J. Appl. Physiol. No.19、pp.531-533、1964
- 12)Matsui, I., Yuasa, N., Okikura, M., On contact thermal sensation of floor heating for long period contact, International Ondol Conference、pp.309-315、1996
- 13)松井勇、湯浅昇、米久田啓貴、作業性からみた高温表面の接触可能時間に関する研究、日本建築学会構造系論文集 No.524、pp.29-35、1999年3月
- 14)ISO/TS 13732-2 First edition, Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces - Part 2: Human contact with surfaces at moderate temperature、International Standards Organization、2001

(2006年10月5日原稿受理、2007年7月24日採用決定)