

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760162

研究課題名(和文) 非定常温熱環境下における熱的快適性の定量評価法に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental research on quantitative evaluation method of thermal comfort under unsteady thermal environment

研究代表者

柿本 益志 (KAKIMOTO, Yasushi)

静岡大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50336004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：非定常温熱環境下における熱的快適性の定量評価の確立を目的として、環境温度が非定常に変動する空間での人間の生理学的特性と温冷感の相関を実験的に解明することを試みた。温冷感の過渡的挙動を精度良くトレースできる新たな温冷感申告方法を提案するとともに、環境温度変動によって引き起こされる皮膚表面温度および皮膚血流量の変化が温冷感の過渡的挙動に影響を及ぼしていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of the establishment of the quantitative evaluation method for the thermal comfort under an unsteady thermal environment, experimental study was carried out to clarify the correlation between human physiologic parameters and thermal sensation. New evaluation method which can trace an unsteady behavior of thermal sensation with high accuracy was suggested. It was clarified that the unsteady change of the environmental temperature causes the increase or decrease of skin surface temperature and blood flow rate, and those changes of physiologic parameters are related to the transient behavior of the thermal sensation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：生体熱工学 非定常温熱環境 温冷感 熱的快適性

1. 研究開始当初の背景

ライフスタイルの多様化によって我が国の消費エネルギー量は年々増加している。経済産業省の「エネルギー白書 2010」によれば、産業部門におけるエネルギー消費量は 1973 年度と比較すると 2008 年度では 0.9 倍と減少しているが、民生部門では 2.5 倍と大幅に増加している。民生部門の消費エネルギー量で大きな割合を占めるのが「空調」であり、その割合は 30~40%にも達する。そのため、この分野での省エネルギー対策が喫緊の課題となっている。

空調による消費エネルギーを抑制するには、空調機のエネルギー効率の向上と同時に運転制御の改善が必須である。後者については、空調機メーカーの試算によると、空調の設定温度を 1 度変更することで消費電力を最大 10%程度削減することができるとされている。ここで、空調温度の非正常制御を積極的に導入することにより莫大な量のエネルギー消費を抑制することができ、さらにはピーク時の電力消費量の低減も可能となる。しかし、温熱環境に対する心の満足度、すなわち熱的快適性は、活動効率や動機付け(やる気)および疲労度等に大きな影響を及ぼすため、熱的快適性を保持しつつ省エネルギーを達成するには熱的快適性の定量的指標に基づく最適な非正常運転制御を行う必要がある。

現在、熱的快適性の指標として PMV (Predicted Mean Vote) が広く用いられている。これは温熱環境の 6 要素(室温・平均放射温度・相対湿度・平均風速の物理的要素と着衣量・代謝量の人的要素)から温冷感を 7 段階スケールで予測するもので、国際規格 ISO7730 では快適な PMV の値として $-0.5 < \text{PMV} < 0.5$ を推奨している。しかしながら、PMV は温熱環境が定常状態にある場合を想定した絶対評価であり、非正常温熱環境においては時間ごとに変化する温冷感の相対評価を加味しなければならない。すなわち、従来の温熱環境 6 要素に加え、6 要素の変化速度と変動幅などを新たな要素として組み込む必要がある。したがって、非正常温熱環境下での熱的快適性を定量的に評価するためには従来の PMV の絶対評価だけでは不十分であり、過渡温冷感挙動の相対評価を加味した新たな指標の作成が必要不可欠である。

2. 研究の目的

これまでの研究で、非正常温熱環境下における過渡温冷感挙動に対する新たな相対評価法を提案し、過渡温冷感挙動は環境温度変化速度と密接に関連すること、環境温度変化に対して時間遅れを持つこと、生理学的特性特に皮膚表面温度と皮膚血流量の変化に大きく規定されることを実験により明らかにしている。しかしながら、実験データ(被験者数)が不十分のため定量的評価には至っていない。そこで本研究では過渡温冷感の相対評価法の更なる改善を図り、幅広い条件での

実験データを蓄積し、環境要素(室温とその変化速度)と生理学的特性(体温および血流量)および過渡温冷感の相関を定量的に整理し、非正常温熱環境下での熱的快適性の定量的評価法の構築に対する基礎的知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

環境パラメータ(室温、湿度)を制御できる温熱環境実験室内に被験者を座位の状態に設置し、室温をある一定の状態から徐々に下降(または上昇)させ再び元のレベルまで上昇(または下降)させる。この間、被験者には主観的な温冷感を後述する方法に従って随時申告してもらう。同時に、赤外線熱画像カメラによる被験者の皮膚表面温度分布、熱電対による首筋、腕、指先等の局所皮膚表面温度の経時変化、赤外線温度計による鼓膜温度(深部体温)の経時変化を計測する。またレーザードップラー血流計を用いて指先の血流量を測定する(図 1)。被験者のデータとしては、身長、体重、体組成(体脂肪率、皮下脂肪率、骨格筋率、基礎代謝)を測定する。

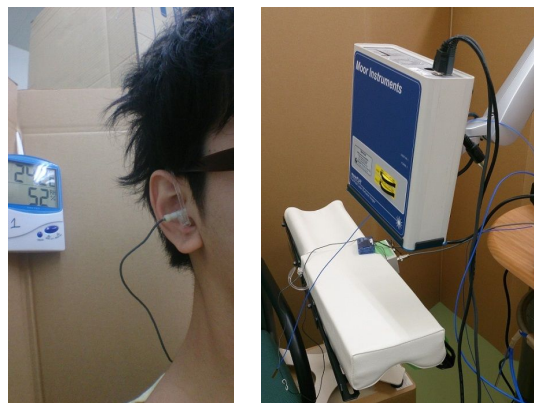
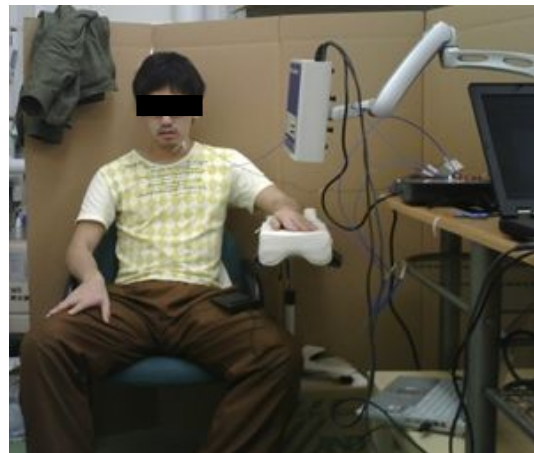


図 1 実験方法(上段: 実験中の被験者、(下段左: 深部体温測定、下段右: 血流計)

この一連の実験を 23 名の被験者(静岡大学の健康な 20 代前半の男子学生)に対して行い、データを蓄積・分析することによって温熱環境パラメータ生理学的特性(体温、血流量)および過渡温冷感挙動の相関、温熱環

境パラメータに対する生理学的特性と温冷感の追従性（遅れ時間）など、非定常温熱環境下における過渡温冷感の基礎的挙動を明らかにする（図2）。なお、生理学的特性や温冷感挙動には年齢や性別の違いが大きく影響すると考えられるが、本実験では最も基本となる知見を得ることを目的とし、被験者の年齢層、性別、着衣量、代謝量（作業量）の影響の詳細な検討は今後の課題とする。

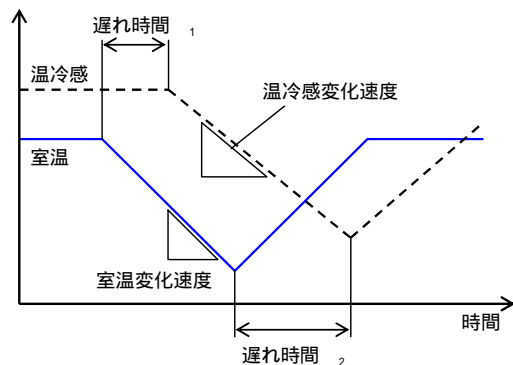


図2 温冷感の過渡的挙動（模式図）

本実験では温冷感の申告方法が最重要である。従来広く使用されている温冷感申告法（PMV）は、温熱環境が定常状態にある状況での温冷感を7段階の絶対評価で申告する指標であるが、非定常温熱環境においては時間ごとに変化する温冷感挙動の相対的評価が必要となる。そこで、まず、図3のような過去に提案した新たな温冷感申告法に基づき実験を行う。すなわち、実験開始時の温冷感レベルを0とし、被験者が現時点よりも相対的に暑くなったと感じれば+1、寒くなったと感じれば-1をカウントする。この際、温冷感スケールには上限、下限を設けず、温冷感の変化を感じた際には被験者はいつでも自由に温冷感を申告できるものとする。なお、本申告方法は実験データを蓄積しながら随時改良していく。

従来の温冷感申告法 PMV（定常環境での絶対評価）
<ul style="list-style-type: none"> 7段階スケール（+3：暑い，+2：暖かい，+1：やや暖かい，0：中立，-1：やや涼しい，-2：涼しい，-3：寒い）で温冷感を評価する。
新しい温冷感申告法（非定常環境での相対評価）
<ul style="list-style-type: none"> 実験開始時の温冷感レベルを0とする。 被験者が現時点より暑くなったと感じれば+1，寒くなったと感じれば-1をカウントする。 温冷感スケールには、上限、下限を設けない。 温冷感の変化を感じた際には、被験者はいつでも自由に温冷感を申告できる。

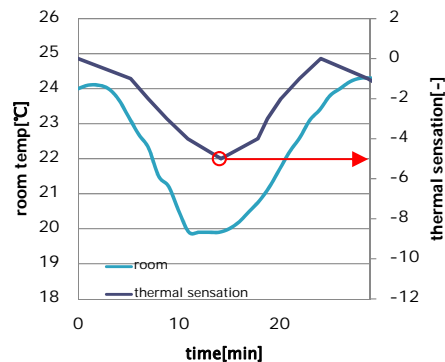
図3 温冷感申告法

4. 研究成果

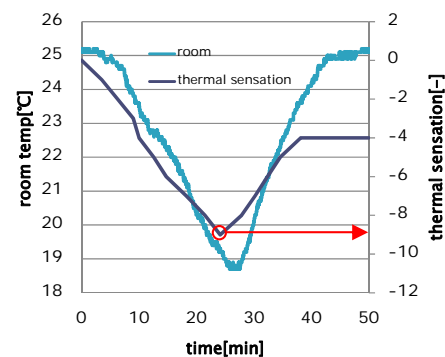
(1)非定常温熱環境下における過渡温冷感の申告方法の改良

過渡温冷感の申告方法として、ある一定の時間間隔ごと（例えば1分おき）に温冷感の変化を±1で申告する方法（申告法1）と、

前述のように温冷感の変化を感じたその都度±1で申告する方法（申告法2）で実験を行った結果、申告法1では被験者が一定時間間隔ごとの温冷感の違いを定量的に評価するのが困難であり、また申告法2では温冷感レベルの解像度が低いため室温変化速度の違いによる温冷感挙動の違いを捉え難く、室温変化速度が大きい（室温が急激に変化する）場合は温冷感の変化量を過少な、逆に室温変化速度が小さい（室温がゆるやかに変化する）場合は温冷感の変化量を過大に評価する傾向があることがわかった（図4）。



(a) 室温変化速度 0.5 /min



(b) 室温変化速度 0.2 /min

図4 室温と温冷感の変化（申告法2）

そこで、申告法2を改良した以下の申告法3を新たに提案する。

- ・実験開始時の温冷感レベルを0とする。
 - ・被験者が現時点より温冷感の変化を感じた場合、+3（大幅に温かく感じた）、+2（暖かく感じた）、+1（やや暖かく感じた）、-1（やや寒く感じた）、-2（寒く感じた）、-3（大幅に寒く感じた）をカウントする。
 - ・温冷感スケールには、上限・下限を設けない。
 - ・温冷感の変化を感じた際には、被験者はいつでも自由に温冷感を申告できる。
- 申告法3の導入により、上述の申告法1および2の問題点を解決し、より高分解能かつ正確な温冷感の非定常挙動をトレースできるようになった（図5）。

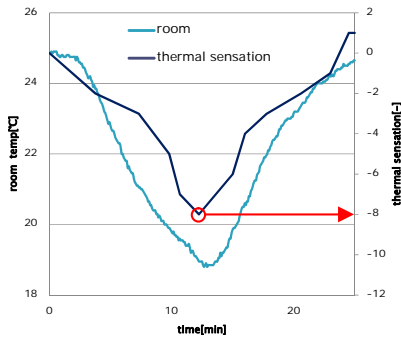


図5 室温と温冷感の変化（申告法3）
（室温変化速度 0.5 /min）

(2)非定常温熱環境下における環境パラメータ，生理学的特性，過渡温冷感挙動の定量評価

室温を初期温度 24 ，温度変化 5 ，温度変化速度 0.25 /min で変化させた場合における代表的な温冷感挙動を図6に，体温変化を図7に，血流量変化を図8に示す。

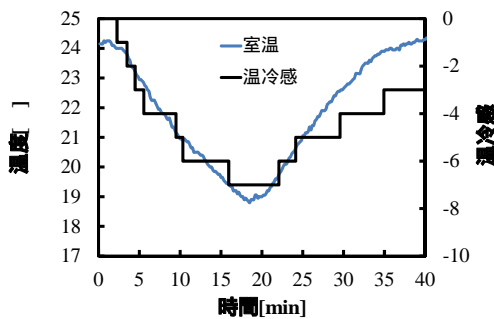


図6 過渡温冷感挙動

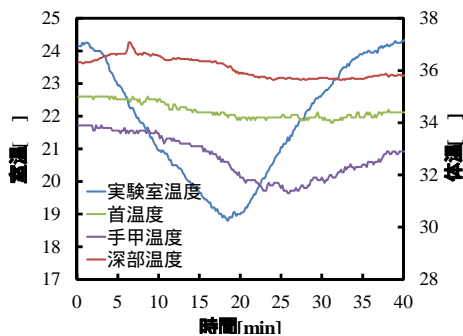


図7 体温変化

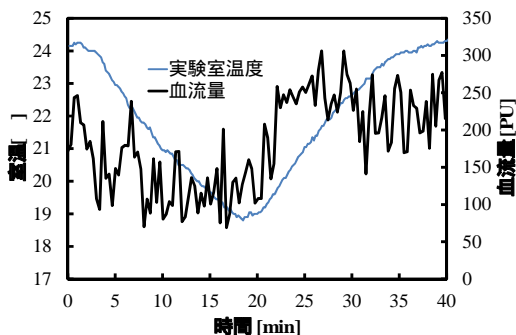


図8 血流量変化

前述の申告法3で得られた過渡温冷感挙動は室温変化に追従するように変化したが，最終的な温冷感レベルは元の状態（ゼロ）には戻らず，温冷感の最終値は被験者の7割で負の値となった．また，室温の低下速度と上昇速度は同じであるにも関わらず，温冷感室温低下時よりも上昇時のほうが緩やかに変化する傾向が見られた．すなわち，環境温度の変化量と変化速度が同じ場合，環境温度が上昇する場合よりも下降する場合のほうが温冷感の変化を強く感じるということがわかった．また，体組成率と温冷感レベルの関係を図9，図10に示す．温冷感レベルの最小値および最終値は，被験者の体脂肪率あるいは皮下脂肪率が小さいほど低くなる傾向が見られた．なお，申告法3で得られた温冷感挙動においては，環境温度変化と過渡温冷感挙動の間には優位な時間遅れは認められなかった．

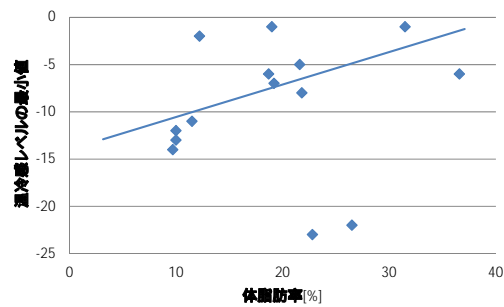


図9 温冷感レベルの最小値

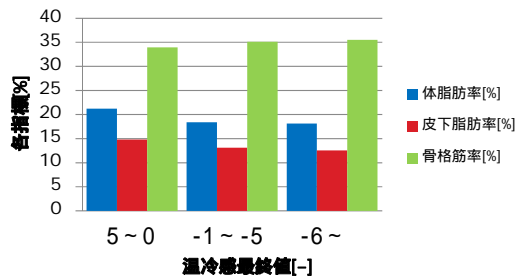
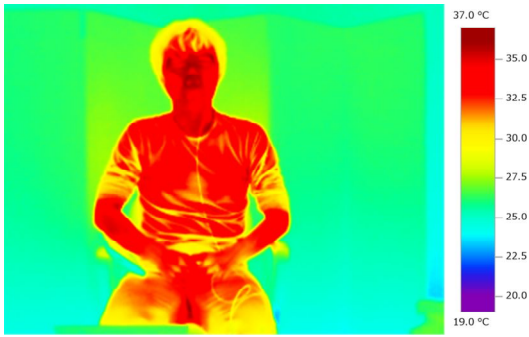
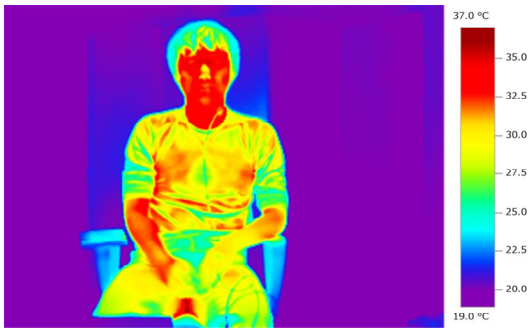


図10 温冷感レベルの最終値

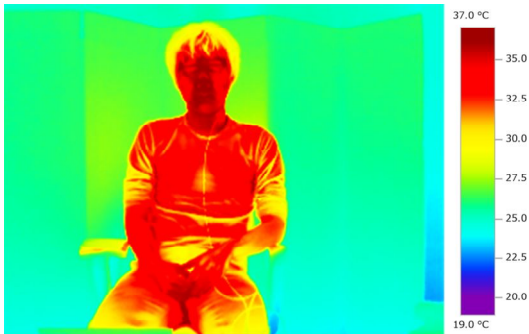
体温や血流量といった生理学的特性も環境温度変化に追従するように変化しているが，深部体温（鼓膜温度）および首部表面温度変化幅は極めて小さい．一方，手甲表面温度や指先の血流量のような末端部の生理学特性は環境温度変化に対して高感度で変化している．これは図11の体表面温度分布の時間変化からも明らかである．以上のことから，過渡温冷感挙動は末端部の生理学特性と密接に関連していると考えられ，その相関が定式化できれば環境パラメータの変動に伴う末端部の生理学的特性の変化を予測することで過渡温冷感を評価することが可能となる．



(a) 実験開始時



(b) 室温最低時



(c) 実験終了時

図 11 体表面温度分布の時間変化

本研究では環境パラメータに対する過渡温冷感挙動を定性的に明らかにし、過渡温冷感挙動に影響を及ぼす因子を見出すことができた。しかしながら、被験者数および実験条件が限られており、相関を定量的に評価するまでには至らなかった。今後も引き続き実験を行い、広範な実験条件と被験者に関するデータを蓄積し、非定常温熱環境における熱的快適性の定量評価方法の確立を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柿本 益志 (KAKIMOTO Yasushi)

静岡大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50336004

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし