

## 非定常状態における温冷感予測に関する研究

## —代謝量が増加する過程への 2 次元温冷感マップの適用可能性—

松本 祥 高田 暁  
神戸大学大学院工学研究科**Study on Prediction of Thermal Sensation in Non-Steady State  
Applicability of Two-Dimensional Thermal Sensation Map to Processes with Change in  
Metabolic Rate-**Sho MATSUMOTO, Satoru TAKADA  
*Graduate School of Engineering, Kobe University*

**Abstract:** To predict thermal sensation in non-steady state, the authors proposed a thermal sensation map on the plane with axes of the mean skin temperature and its change rate, based on the data obtained in the subject experiment, and showed the validity of the map for the sedentary condition. In this study, we conducted the subject experiment including processes with change in metabolic rate, and checked the applicability of the map to such processes. As the results, it is possible to reproduce the tendency of thermal sensation in processes with the change in both environment and metabolic rate at the same time. However, in the process only with the change in the metabolic rate, the tendency of thermal sensation cannot be predicted while walking period and the period right after walking. It was shown that there is room for investigation left for the influence of the skin temperature in specific portion of the body on thermal sensation of whole body, and for the predicted thermal sensation plotted at the edge of the map.

**Key Words:** Non-Steady State, Thermal Sensation, Skin Temperature, Subject Experiment, Metabolic Rate

**要旨 :** 非定常状態での温冷感を生理量から予測することを目的として、椅座安静条件の被験者実験から得られたデータを基に、平均皮膚温とその変化率を 2 軸とする平面上の温冷感マップを提案した。これまでに、この温冷感マップを用いることで、椅座安静条件での非定常状態における温冷感を再現できることを示している。本報では、代謝量が増加する過程を含む被験者実験を行い、得られた皮膚温変動にマップを適用した。その結果、代謝量の変化と同時に環境条件が増加する過程においては、温冷感申告値の傾向を再現することができた。しかし、代謝量のみを増加させる過程では、歩行中及び歩行終了直後における温冷感申告値の傾向を再現できなかった。特定部位の皮膚温が全身温冷感に及ぼす影響や、マップ端部での温冷感予測値に検討の余地が残されている。

**キーワード :** 非定常状態、温冷感、皮膚温、被験者実験、代謝量

## 1. はじめに

本研究では、非定常状態での温冷感を生理量から予測する体系の構築を目的としている。生理量と心理量の関係について、定常状態では平均皮膚温と温冷感がよく対応していると言われている(小川ら、1977)。非定常状態については、森ら(2003)によって予測式が提案されているが、5 つの説明変数があり、簡略化の余地が残されているように思われる。そこで、著者ら

は、Hensel の研究(1981)から、平均皮膚温とその変化率に着目し、説明変数を減らすことで、予測モデルの簡略化を図った。椅座安静条件の被験者実験から得られたデータを基に、平均皮膚温とその変化率を 2 軸とする平面上の温冷感マップを提案し(松本ら、2010)、代謝量が一定である、椅座安静条件での非定常状態における温冷感申告値を再現できることを示している。本報では、代謝量が増加する過程を含む 2 種類の被験

者実験を行い、得られた皮膚温変動にマップを適用して温冷感申告値を再現できるかを検討する。1 つ目の実験では、空調された室への出入りを想定し、代謝量の変化と同時に環境条件も変化させる。2 つ目の実験は、全館空調されている執務空間を想定し、代謝量のみを変化させるものである。

## 2. 2次元温冷感マップの概要

皮膚温が高いもしくは上昇傾向にあるとき「暑い」と感じ、皮膚温が低いもしくは下降傾向にあるとき「寒い」と感じるという仮説に基づき、平均皮膚温とその変化率から非定常状態における温冷感を予測する体系である。

椅座安静条件での非定常状態（図 1）における平均皮膚温と温冷感申告値（図 2）を記録する実験（高田ら、2009）から得られたデータを用いて、温冷感マップを作成した（1 分間隔、計 6203 データ）。着衣条件はトランクス 1 枚（0.03clo）とし、気温変化は日常生活で生じる皮膚温変動を可能な限り網羅するように設定している（図 1）。また、雑音の影響を極力排除するため、平均皮膚温の測定データ（10 秒間隔）を適当な区間ごとに関数近似し、変化率を解析的に求める。ここで、実験毎に、中立環境と思われる実験初期 30 分の平均皮膚温の時間平均値を基準として、平均皮膚温の個人差を補正する。平均皮膚温の変化率は基準化せずに用いる。基準化した平均皮膚温とその変化率を 2 軸とする平面を離散的な格子に分割し、被験者実験で得られた平均皮膚温とその変化率のデータを平面上にプロットする。各格子に属するデータの温冷感申告値について平均値を求め、予測温冷感申告値として各格子に定義する。このようにして求めた温冷感マップを 2 次元温冷感マップと呼称し、図 3 に示す。図 3 に示す右側のマップは、左側のマップの定常状態に近い範囲について細分化を行ったものである。温冷感予測には細分化したマップを用いる。また、作成した 2 次元温冷感マップを用いることで、椅座安静条件の被験者実験より得られた、非定常状態における温冷感申告値を再現できることを示している（松本ら、2010）。

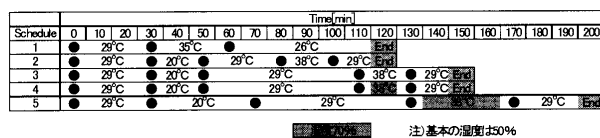


図 1 実験スケジュール

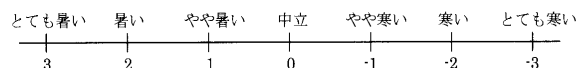


図 2 温冷感スケール

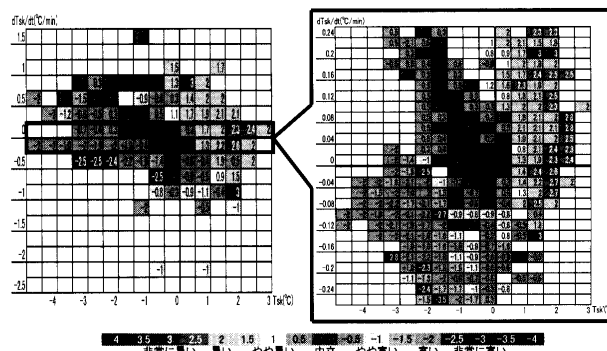


図 3 2次元温冷感マップ

## 3. 環境及び代謝量が変化する過程への適用

### 3.1 実験概要

空調された室への出入りを想定した、代謝量の変化と同時に環境条件が変化する過程において、生理量と心理量を測定する被験者実験（実験 I）を実施した。被験者は健康な男子学生 2 名とした。被験者の身体的特徴を表 1 に示す。実験 I は、2010 年 8 月に神戸大学内にて行った。被験者の行動スケジュールを表 2 に、測定項目を表 3 に示す。皮膚温は Hardy&DuBois の 7 点とした。温冷感は図 1 を用いて、10 分間隔（行動変化後 10 分間は 2 分間隔）で申告させた。実験中の被験者の周辺環境を図 4 に、代謝量の変化を図 5 に示す。

表 1 被験者の身体的特徴

|      | 年齢(才) | 身長(cm) | 体重(kg) | 体脂肪率(%) | 皮下脂肪厚(mm) | 参加実験        | 着衣条件(clo)*            |
|------|-------|--------|--------|---------|-----------|-------------|-----------------------|
| 被験者A | 23    | 171    | 64     | 18.3    | 23        | 実験 I、II(午前) | 実験 I 0.5, 実験 II 0.45  |
| 被験者B | 22    | 177    | 61     | 12.5    | 21        | 実験 I、II(午前) | 実験 I 0.45, 実験 II 0.45 |
| 被験者C | 24    | 169    | 67     | 18.6    | 29        | 実験 I(午後)    | 0.55                  |
| 被験者D | 22    | 166    | 57     | 12.1    | 13        | 実験 I(午後)    | 0.55                  |

\*ISO7730, 2005 p.20

表 2 行動スケジュール（実験 I）

| 時間 | 0    | 30   | 60   | 90   | 120  | 150  | 180  | 210  | 240  | 270  | 300  |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 場所 | 空調室  | 非空調室 | 空調室  | 非空調室 | 空調室  | 屋外   | 空調室  | 屋外   | 空調室  | 空調室  | 空調室  |
| 行動 | PC作業 | 椅座安静 | 椅座安静 | 歩行   | 食事   | 椅座安静 | PC作業 | 椅座安静 | 歩行   | 椅座安静 | PC作業 |
| 気温 | 27°C | 31°C | 23°C | 31°C | 26°C | 32°C | 27°C | 27°C | 33°C | —    | 27°C |
| 日射 | —    | —    | —    | —    | あり   | —    | —    | なし   | あり   | なし   | —    |

表 3 測定項目（実験 I）

|     | 測定項目                | 測定間隔   | 測定機器                  |
|-----|---------------------|--------|-----------------------|
| 物理量 | 気温                  | 10秒    | 小型温湿度計(espec社製サーモロガー) |
|     | 相対湿度                | 10秒    | 小型温湿度計(espec社製サーモロガー) |
| 生理量 | 皮膚温(Hardy&DuBois7点) | 10秒    | 温度ロガー(Gram社製T-8A)     |
|     | 代謝量                 | 1分     | 身体活動量計(アクティマーカー)      |
|     | 心拍数                 | 2分、10分 | 光電脈波検出式心拍計(キャットアイ)    |
| 心理量 | 温冷感申告値              | 2分、10分 | —                     |

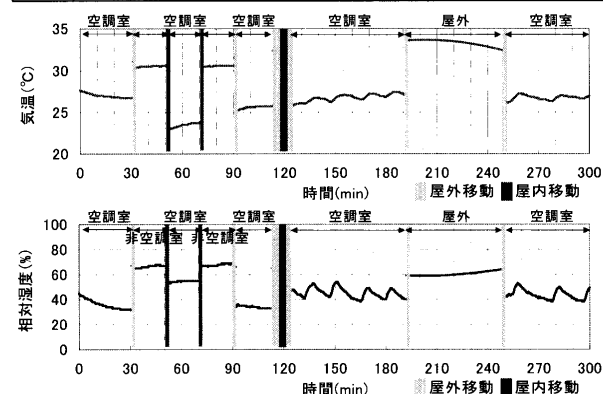


図 4 温湿度変化（実験 I）

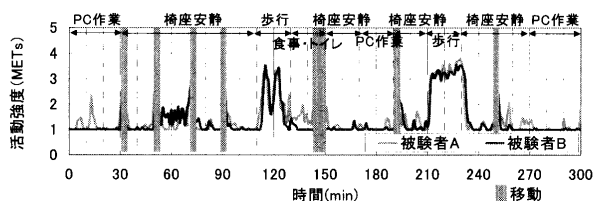


図5 代謝量\*変化 (実験Ⅰ)

\*1MET: 椅子安静時の酸素需要量 ( $=3.5\text{mlO}_2/\text{kg}/\text{min}$ )、 $n\text{METs} = n \times 3.5\text{mlO}_2/\text{kg}/\text{min}$ 、測定に用いた Panasonic 社製アクティマーカーは、加速度センサを用いて、振動から活動強度を測定するものである。

### 3.2 結果と考察

平均皮膚温とその変化率の時系列を図6に示す。被験者毎に、皮膚温変動が小さく、「中立」申告のあった0～30分の平均皮膚温の時間平均値で平均皮膚温を基準化した。得られた皮膚温変動に、2次元温冷感マップ(図3)を適用して温冷感予測値を求める。温冷感予測値及び温冷感申告値を時系列で図7に示す。

平均皮膚温には、実験を通して被験者間で $0.5^\circ\text{C}$ 程度の差があった(図6)が、温冷感申告値には、差がなかった(図7)。また、代謝量の変化が、平均皮膚温や温冷感に及ぼす影響は確認できなかった。

2次元温冷感マップを用いて求めた温冷感予測値は、椅子安静時とは代謝量の異なる過程においても、温冷感申告値の変化の傾向をよく再現できていた(図7)。これより、平均皮膚温について基準化したマップを用いることで、環境及び代謝量に変化する過程における温冷感申告値を予測できることを示した。

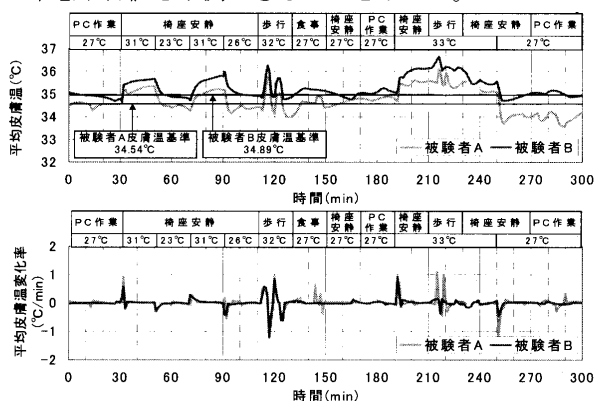


図6 平均皮膚温と変化率

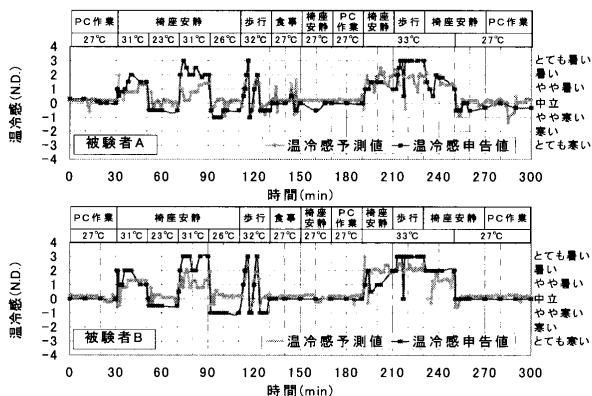


図7 温冷感申告値及び予測値

## 4. 代謝量のみが変化する過程への適用

### 4.1 実験概要

全館空調されている執務空間を想定し、代謝量のみを変化させる過程において、生理量及び心理量を測定する被験者実験(実験Ⅱ)を実施した。これは、温湿度一定条件下に被験者を曝露し、歩行により代謝量を変化させるものである。被験者は健康な男子学生4名とし、被験者の身体的特徴を表1に示す。実験は、2010年9月に神戸大学工学部地下1階廊下にて、午前、午後に分けて行った。実験場所の平面図を図8に、実験スケジュールを表4に、測定項目を表5に示す。実験開始前、被験者は椅子安静状態で30分待機した。その後、椅子安静、歩行(普通歩行、速歩)を20分毎に繰り返して行った。皮膚温はHardy&DuBoisの7点とし、温冷感申告値は図1を用いて2分間隔で測定した。実験空間の温湿度は図9に示す5点で測定した。温湿度5点の平均値の時系列を図9に示す。また、代謝量の変化の時系列を図10に示す。

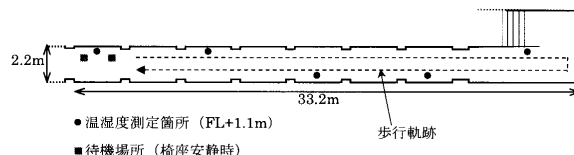


図8 実験場所平面図

表4 実験スケジュール (実験Ⅱ)

| 時間 | -30 | 0    | 20           | 40   | 60         | 80   | 100 |
|----|-----|------|--------------|------|------------|------|-----|
| 行動 | 待機  | 椅子安静 | 普通歩行 (3METs) | 椅子安静 | 速歩 (4METs) | 椅子安静 |     |

表5 測定項目 (実験Ⅱ)

| 測定項目                  | 測定間隔 | 測定機器                    |
|-----------------------|------|-------------------------|
| 物理量                   |      |                         |
| 気温(5箇所)               | 10秒  | 小型温度計 (espec社製サーモレコーダー) |
| 相対湿度(5箇所)             | 10秒  | 小型湿度計 (espec社製サーモレコーダー) |
| 皮膚温 (Hardy&DuBois 7点) | 10秒  | 温度ロガー (Gram社製LT-8A)     |
| 代謝量                   | 1分   | 身体活動量計 (アクティマーカー)       |
| 体重                    | 実験前後 | 電子天秤 (メトラートレドKGC150)    |
| 体脂肪率                  | 実験前後 | 体組成計 (カラダスキャンHBF-362)   |
| 皮下脂肪厚                 | 実験前後 | 皮下脂肪厚測定器 (T.K.K.5011a)  |
| 心拍数                   | 2分   | 光電脈波検出式心拍計 (キャットアイ)     |
| 心理量                   |      |                         |
| 温冷感申告値                | 2分   | —                       |

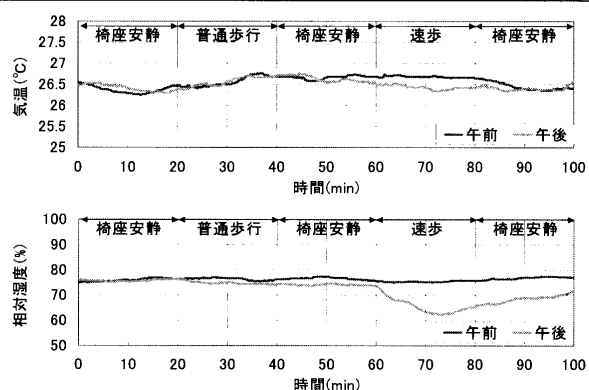


図9 温湿度変化 (実験Ⅱ)

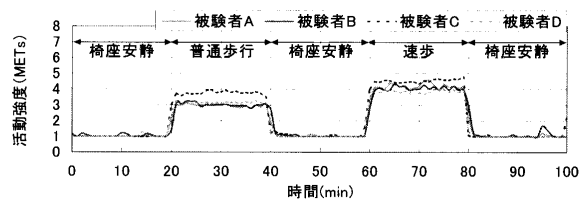


図10 代謝量変化 (実験Ⅱ)

## 4.2 結果と考察

平均皮膚温とその変化率の時系列を図 11 に示す。被験者毎に、皮膚温の変動が小さく、「中立」申告のあった 0~20 分の平均皮膚温の平均値で平均皮膚温を基準化した。なお、被験者 D については 0~20 分に「暑い」申告であったため、0~20 分の平均皮膚温の平均値から 1.0℃低い値を基準とした。得られた皮膚温変動に、2 次元温冷感マップ (図 3) を適用して温冷感予測値を求める。図 12 に温冷感予測値及び温冷感申告値の時系列を示す。

温冷感申告値と予測値を比較する (図 12)。歩行開始直後、対流熱伝達率の増加に伴う平均皮膚温の低下と同時に、温冷感申告値が低下する傾向は再現できていた。しかし、その後、平均皮膚温は低下を続ける (図 11) が、温冷感申告値は徐々に上昇し、歩行終了直後に温冷感申告値が最大値となる傾向は再現できなかった (図 12)。この原因の 1 つとして、皮膚温の測定点である Hardy&DuBois の 7 点は、額、腹、前腕、手背、大腿、脛、足背であり、身体背部など、気流の影響が小さい部位を含まない。また、運動による筋発熱が多く皮膚温が上昇している部位が、他の部位に比べ温冷感に及ぼす影響が大きいことも考えられる。このことから、歩行時に関して、温冷感予測に用いる皮膚温の検討が必要である。

歩行終了後について、温冷感申告値は「暑い」から「中立」に徐々に下降している (図 12)。しかし、平均皮膚温は上昇しているため (図 11)、予測値が徐々に上昇し、申告値とは異なる傾向になった。この時の皮膚温変動は、マップ上では図 13 のようになる。マップ中央上部 ( $-1.5 < T_{sk} \leq 0$ ,  $0.20 < dT_{sk}/dt$ ) に関して、2 章で述べたマップ作成時の原データのヒストグラムを図 14 に示す。この領域は「中立」だけでなく「やや暑い」「暑い」申告もあり、本実験の傾向と一致するデータが存在した。このような領域では、比較的少ないデータの平均値からその領域のカテゴリー (予測温冷感申告値) を決定していることから、検討の余地があると考えられる。

## 5. まとめ

各被験者の中立環境における平均皮膚温を基準として補正を行った 2 次元温冷感マップを作成した。代謝量が変化する過程を含む被験者実験を行い、得られた皮膚温変動に 2 次元温冷感マップを適用して温冷感申告値を再現できるかを検討した。代謝量の変化と同時に環境条件が変化する過程においては、温冷感申告値の傾向を再現できた。しかし、歩行によって代謝量のみを変化させる過程では、歩行中及び歩行終了直後における温冷感申告値の傾向を再現できなかった。特定

部位の皮膚温が全身温冷感に及ぼす影響や、2 次元温冷感マップの端部での温冷感予測値に検討の余地が残されていることが明らかになった。

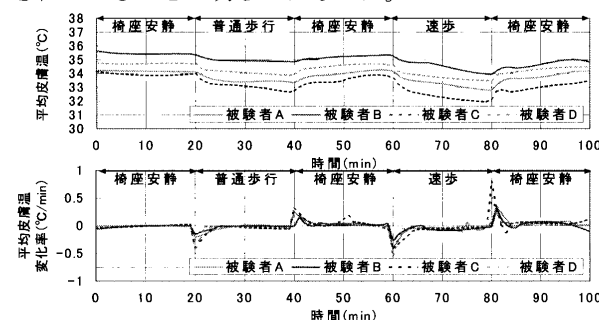


図 11 平均皮膚温と変化率

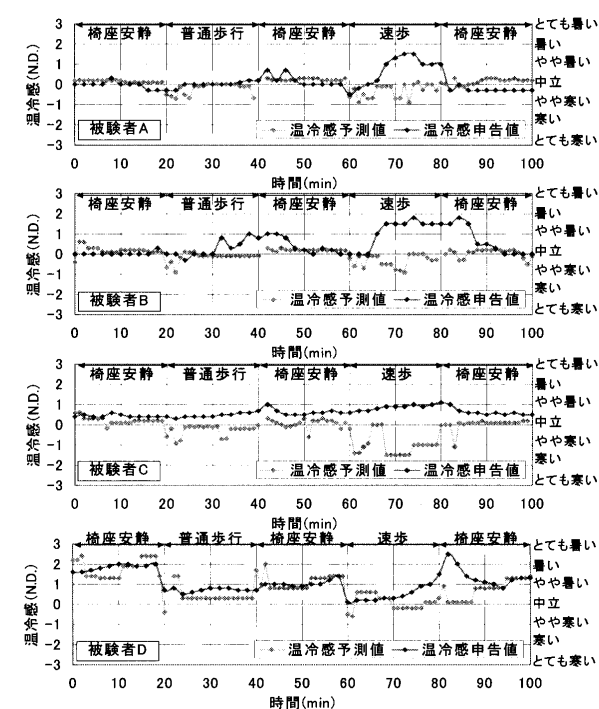


図 12 温冷感申告値及び予測値

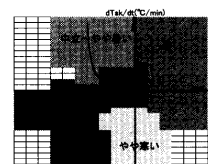


図 13 皮膚温変動

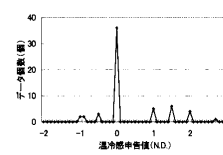


図 14 ヒストグラム

## 6. 参考文献

- 小川庄吉他, 1977: 軽作業時の温冷感に関する研究, 公衆衛生院研究報告, 26(3・4), 142/151,
- 森郁恵他, 2003: 非定常状態における温冷感予測に関する実験的考察, 日本建築学会計画系論文集, 563, 9/15,
- H.Hensel, 1981: Thermoreception and temperature regulation, Monographs of Physiological Society, 38, Academic Press, 33/35
- 松本祥他, 2010: 非定常状態における温冷感予測に関する研究—皮膚温を用いた 2 次元温冷感マップの提案—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, 533/534,
- 高田暁他, 2009: 非定常状態における温冷感予測に関する研究—皮膚温を用いた予測式の提案—日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, 361/362,

### <連絡先>

著者名: 松本 祥  
住 所: 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1  
所 属: 神戸大学工学研究科  
E-mail アドレス: 108t059t@stukobe-u.ac.jp