HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 平均皮温・体内温予測モデルを用いた暑熱環境の評価－予測モデルの検証実験－ |
| Author(s) | 中谷, 則天; 桑原, 浩平; 窪田, 英樹; 濱田, 靖弘; 中村, 真人; 馬締, 俊佑; 加藤, 隆康; 丸山, 隆; 宮崎, 芳明; 木戸, 俊行; 渡部, 弘隆 |
| Citation | 衛生工学シンポジウム論文集, 13, 127-130 |
| Issue Date | 2005-11-16 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/1348 |
| Type | bulletin (article) |
| Note | 第13回衛生工学シンポジウム（平成17年11月17日（木）-18日（金） 北海道大学クラーク会館）. 一般セッション. 4 建築 都市エネルギー利用. 4-4 |
| File Information | 4-4_p127-130.pdf |

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# ４－４　平均皮温・体内温予測モデルを用いた暑熱環境の評価
## －予測モデルの検証実験－

○ 中谷　則天（北海道大学）　桑原　浩平（北海道大学）　窪田　英樹（北海道大学）
濱田　靖弘（北海道大学）　中村　真人（北海道大学）　馬締　俊佑（北海道大学）
加藤　隆康（トヨタ自動車）　丸山　隆（トヨタ自動車）　宮崎　芳明（トヨタ自動車）
木戸　俊行（トヨタ自動車）　渡部　弘隆（トヨタ自動車）

### はじめに

熱中症等の高温障害は，屋外のみならず，屋内においても夏期に頻発しており，日常生活においても対応が迫られている大きな問題であるといえる．近年，地球温暖化やヒートアイランド現象と呼ばれる高温化が大きな問題となっているが，その影響が懸念される暑熱環境に対しては，安全対策の観点からも，信頼のおける簡便な評価指標の構築が望まれている．本研究は，暑熱環境における温熱的な安全対策を支援することを目的として，人体の温熱的な状態を表す代表的生理量である平均皮膚表面温度（平均皮温）[1]及び体内温度（直腸温）[2]に着目し，評価指標として利用しようとするものである．

既報[3),4)]では，有効発汗率と着衣の濡れに関する検討を行い，無効発汗の有効発汗への転化率ともいうべき無効発汗復活率$k_{dr}$を導入することにより，無効発汗と着衣の濡れを考慮した平均皮温予測モデルを提示した．本報は，この平均皮温・体内温予測モデルの有効性をさらに検証するために実施したものである．

### １．実験概要

1.1　実験条件と測定項目

運動時の温熱性発汗特性を把握し，平均皮温・体内温予測モデルの検証を行うことを目的として，被験者実験を行った．実験は，北海道大学工学部内の温熱環境試験室において行われた．被験者は健康な青年男子 4 名とし，裸体時（0 clo）と軽衣時（0.42 clo）について実験を行った．表－１に被験者データを，また表－２に着衣のデータを示す．設定代謝量を中等度運動（約 4 met）として，自転車エルゴメータに負荷をかけた．試験室の環境条件は，裸体時においては室温 26，29，32，36，39℃，着衣時においては 25，28，33℃とし，相対湿度 50%，風速 0.2 m/s とした．測定項目は，代謝量，体重減少量，鼓膜温，直腸温，心拍数，皮膚表面温度（額，躯幹部（腹部，背中），前腕，手背，大腿，下腿，足背の 8 点），着衣重量，室内温度，相対湿度およびグローブ温度とした．また，実験中の暑さ感，湿度感，総合的な不快感および運動強度感に関する主観申告も行った．さらに，裸体時の発汗特性の観察や着衣の濡れ具合も随時観察した．

表-1　被験者データ

| 被験者 | 年齢[才] | 身長[m] | 体重[kg] | 体表面積[㎡] |
|---|---|---|---|---|
| A | 22 | 1.82 | 80 | 2.01 |
| B | 24 | 1.69 | 80 | 1.90 |
| C | 23 | 1.75 | 56.5 | 1.68 |
| D | 22 | 1.72 | 60 | 1.71 |

体表面積(DuBois面積)=0.202*(体重)$^{0.425}$*(身長)$^{0.725}$[㎡]
身長[m], 体重[kg]

1.2　実験方法

まず被験者は試験室に入室後，裸体体重と着衣重量を測定する．その後，皮膚表面温度測定用のサーミスタを所定の場所に貼り付け，実験用衣服を身に着ける．そして，1 分間の体重・鼓膜温測定，主観申告と，9 分間の自転車エルゴメータ運動を行う 10 分 1 サイクルの運動を設定室温に応じて 120 分，または 180 分間続ける．運動時間の設定は定常状態に達すると考えられる時間として室温に応じて選択した．皮膚表面温度・グローブ温度の測定は，10 秒間隔，湿度の測定は 10 分間隔で行った．なお，皮膚温測定部位・平均皮温の算出は Hardy-DuBois の 7 点法に基づいた．実験は 2004 年 10 月から 12 月にかけて行われた．主観申告は，暑さ感・湿度感・不快感には線形尺度を用いた（例；暑さ感　非常に寒い - 1～非常に暑い+1），また運動強度感は「非常に楽である」～「非常にきつい」までの７段階尺度を用いた．

### ２．実験結果

#### 2.1　裸体実験（0 clo）における測定結果

(1) 環境要素

表-2　着衣データ

| | 代謝量 [met] | clo値 | 服装 |
|---|---|---|---|
| 裸体 | 4 | 0 | トランクス |
| 着衣 | | 0.42 | トランクス、Tシャツ、靴下、薄手ズボン、作業帽、手首サポーター、軍手、安全靴 |

表-3　実測温湿度（0 clo）

| 設定温度 [℃] | A | | B | |
|---|---|---|---|---|
| | 温度[℃] | 湿度[%] | 温度[℃] | 湿度[%] |
| 26 | 26.2 | 56 | 26.3 | 57 |
| 29 | 29.3 | 55 | 29.4 | 50.5 |
| 32 | 32.4 | 47.9 | 32.5 | 47 |
| 36 | 36.4 | 34.5 | 36.3 | 38 |
| 39 | 39.7 | 35 | 39.2 | 40 |
| 設定温度 [℃] | C | | D | |
| | 温度[℃] | 湿度[%] | 温度[℃] | 湿度[%] |
| 26 | 26.3 | 55 | 26.3 | 56.5 |
| 29 | 29.3 | 47.5 | 29.2 | 53.5 |
| 32 | 32.5 | 50.8 | 32.5 | 47.1 |
| 36 | 36.4 | 37 | – | – |
| 39 | 39.6 | 32 | 39.7 | 30.5 |

表-4　実測温湿度（0.42 clo）

| 設定温度 [℃] | A | | B | |
|---|---|---|---|---|
| | 温度[℃] | 湿度[%] | 温度[℃] | 湿度[%] |
| 25 | 25.2 | 58.5 | 25.3 | 47.5 |
| 28 | 28 | 52 | 28.3 | 51 |
| 33 | 33 | 35 | 33 | 34.5 |
| 設定温度 [℃] | C | | D | |
| | 温度[℃] | 湿度[%] | 温度[℃] | 湿度[%] |
| 25 | 25.2 | 49 | 25.2 | 50 |
| 28 | 28.2 | 49.5 | 28.1 | 51.5 |
| 33 | 33.3 | 35 | 33.1 | 36 |

実測の温湿度を表-3 に示す.

（2）平均皮温・直腸温・鼓膜温・心拍数･発汗密度

図-1, 2 に室内温度と平均皮温・直腸温・鼓膜温・心拍数および発汗密度との関係を示す．ここで示す実験結果は被験者 4 名の平均値であり，鼓膜温，心拍数，主観申告値は最終サイクルの結果を適用している．また，平均皮温，直腸温に関しては最終 3 サイクル（30 分間）の平均値を適用した．平均皮温は室内温度に比例して上昇しており，平均皮温に比例すると考えられる発汗密度も同様の傾向を有していることが確認できる．心拍数についてみると，運動負荷が一定の実験にもかかわらず，室温に比例して上昇していることがわかる．これは，心拍数は代謝だけでなく，温熱性の負荷にも依存していることを意味する．直腸温については直線的に微増しているという結果が得られた．

（3）主観申告

図-3 に室内温度に対する最終サイクルにおける主観申告値の被験者 4 名の平均値を示す．暑さ感と運動強度感は室内温度が 29℃と 32℃の間で大きく増加しており，感覚的に臨界温度の存在を示唆している．運動強度感は室内温度 32℃以上の温度域では「かなりきつい」，「非常にきつい」を申告していた．

## 2.2　着衣実験（0.42 clo）における測定結果

（1）環境要素

実測温湿度を表-4 に示す.

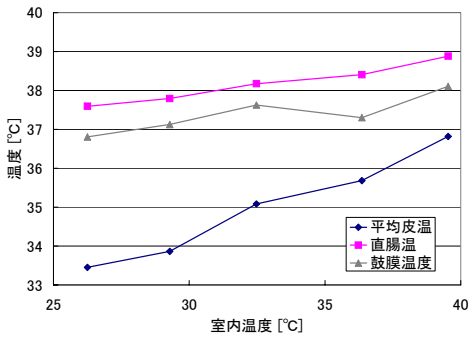


図-1　室内温度と平均皮温・直腸温・鼓膜温の関係（0 clo）

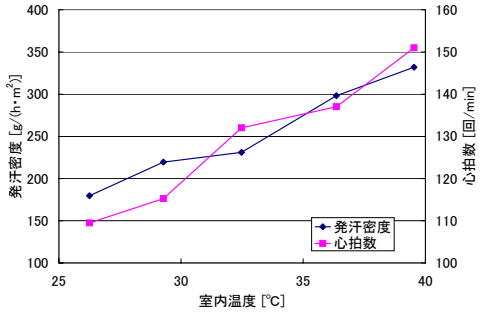


図-2　室内温度と発汗密度・心拍数の関係（0 clo）

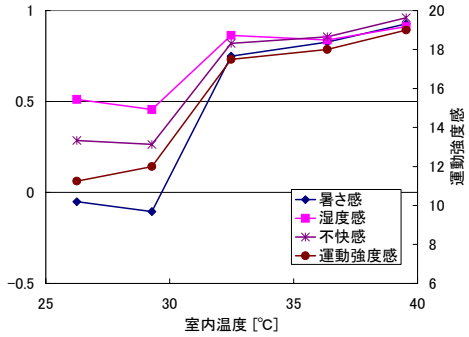


図-3　室内温度に対する主観申告値（0 clo）

（2）平均皮温・直腸温・鼓膜温・心拍数・発汗密度

図-4, 5 に室内温度と各測定項目との関係の被験者平均値を示す．裸体時と同様に，平均皮温は室内温度に比例して上昇しており，その関数である発汗密度も上昇していることが確認できる．直腸温・鼓膜温は裸体時に比し，ほぼ一定で微増の傾向がみられた．心拍数は裸体時と同様に室内温度の上昇に伴い上昇した．

（3）主観申告

図-6 に室内温度に対する主観申告値を示す．暑さ感，不快感はいずれも約 0.5 を越える値で，図-4 の裸体時の高温域に近い値であった．運動強度感も同様に，裸体時における高温域に近い値を示しており，各被験者とも「非常にきつい」を申告していた．

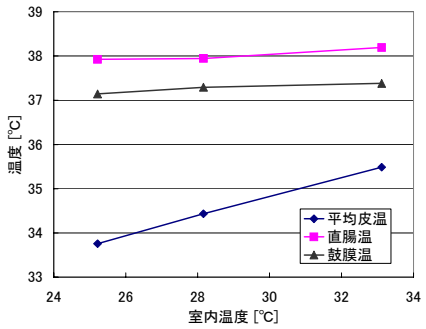


図-4　室内温度と平均皮温・直腸温・鼓膜温の関係（0.42 clo）

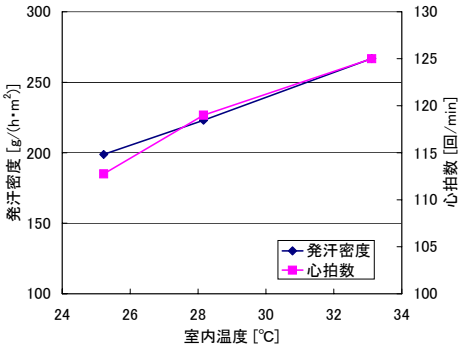


図-5　室内温度と発汗密度・心拍数の関係（0.42 clo）

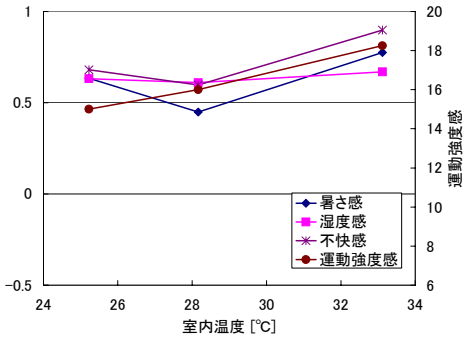


図-6　室内温度に対する主観申告値（0.42 clo）

## 2.3　主観量と生理量の相関関係

図-7, 8 は，平均皮温と暑さ感，直腸温と暑さ感の関係を表したものである．図-7 では，平均皮温が 33.5℃のあたりから暑さ感が上昇しており，深部体温が上昇し始める臨界皮膚温 35.8℃を越えたあたりで「非常に暑い」に達していた．また図-8 では，直腸温が中立温感時の 37.8℃を越えるあたりから暑さ感が急激に上昇しており，体内温が中立温度を超えることと暑さ感が急上昇することの間に強い相関関係がみられた．

図-9 は心拍数と運動強度の関係を示したものである．運動負荷が一定の本実験において，心拍数と運動強度感の間に強い比例関係が得られた．特に，裸体時より着衣時は運動強度感が強い傾向がみられ，着衣量

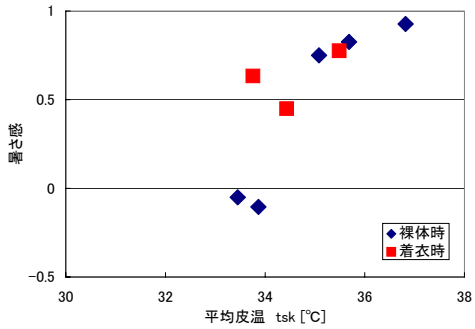


図-7　平均皮温と暑さ感の関係

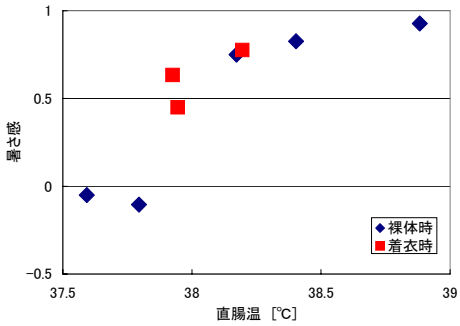


図-8　直腸温と暑さ感の関係

の作業負荷に与える影響に留意すべきことを示している．これは，暑熱による負荷が原因と考えられる．

## 2.4　平均皮温・直腸温度の予測値と実測値の比較

図-10 は定常とみなせる時間帯における平均皮温と発汗開始皮膚温の偏差$\Delta t_{sk}$と温熱性発汗密度との関係を示したものである．実験結果は，代謝量を固定すれば温熱性発汗密度は皮膚温偏差に 1 次比例するとする，本モデルの仮定を実証するものである．

図-11 は裸体時と着衣時の平均皮温の予測値と実測値を比較したものである．予測値は実測結果とほぼ合致していることが確認できる．

図-12 は実測した平均皮温と直腸温の関係を示したものである．概ねモデル[2]と一致しているが，詳細にみると直腸温は平均皮温が体内温上昇開始臨界皮膚温（35.8℃）よりも 1℃程度低いあたりから上昇し始めており，臨界皮膚温のあたりでは 0.5℃程度高くなっている．このことは，臨界皮膚温の近域に対しては，体内温上昇温度域として評価することが必要なことを示していると考えられる．

## おわりに

1）暑熱環境における温熱的安全対策を支援する目的として開発された，簡便な温熱環境評価指標である「平均皮温・体内温予測モデル」の有効性を確認するための検証実験を行った．

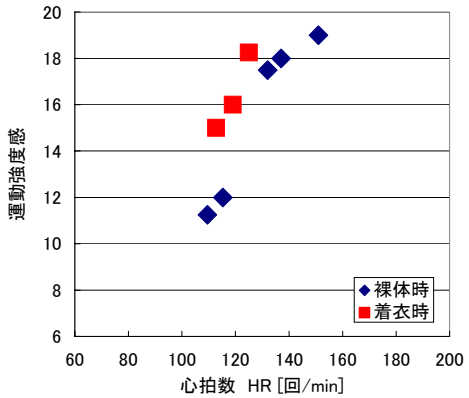


図-9　心拍数と運動強度感の関係

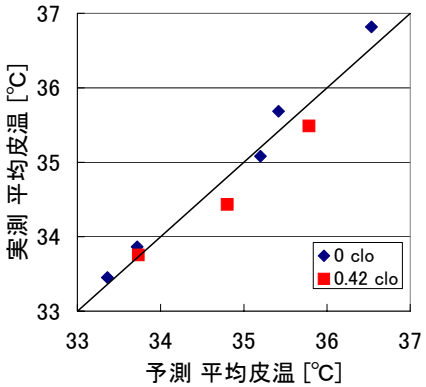


図-11　平均皮温　予測 vs.実測

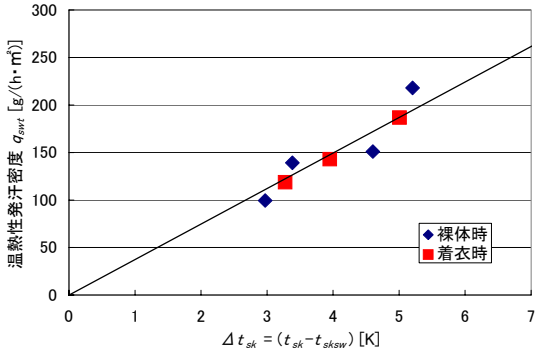


図-10　皮膚温偏差$\Delta t_{sk}$と温熱性発汗密度の関係

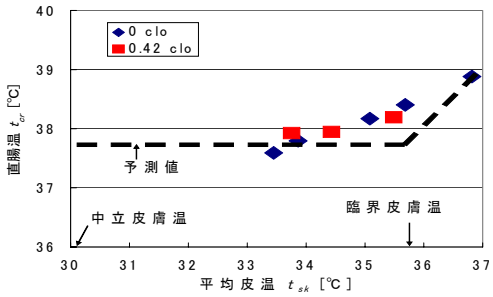


図-12　平均皮温と直腸温の関係

2)　平均皮温と暑さ感において平均皮温が 33.5℃を超えたあたりから暑く感じ始め，体内温上昇開始臨界皮膚温である 35.8℃あたりには「非常に暑く」感じていることが確認された．また，直腸温と暑さ感においても同様に直腸温が中立温度である 37.8℃を越えると急激に暑く感じ始めることがわかった．

3)　心拍数は暑熱による負担（室温上昇）により増加すること，また，心拍数と運動強度感は，着衣量に依存して直線的な比例関係を示しているという結果が得られた．

4)　本予測モデルは，代謝量を固定することで温熱性発汗量が平均皮温と発汗開始皮膚温の偏差$\Delta t_{sk}$の１次関数として近似できることを基礎としているが，本実験においても確認した．

5)　平均皮温予測モデルと実測値を比較することにより，高い再現性を確認した．また，平均皮温と直腸温に関しても，モデルとほぼ一致する結果が得られた．これらの結果より，平均皮温・体内温予測モデルの安全性評価指標としての高い有効性が確認された．

## 参 考 文 献


1）窪田英樹　他:暑熱環境における無効発汗を考慮した人体平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会論文集, 第 575 号, pp83-89, 2004. 1

2）窪田英樹　他：暑熱環境における人体内部温度の予測，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 367-368，1999. 9

3）中村真人　他:工場における局所冷房環境の評価(第 1 報)，運動時の発汗特性と平均皮温に関する実験，平成 16 年度 空気調和・衛生工学会大会　学術講演論文集, pp. 1791-1794, 2004. 9

4）窪田英樹　他:工場における局所冷房環境の評価(第 2 報)，着衣の濡れを考慮した平均皮温予測モデルと作業環境評価，平成 16 年度 空気調和・衛生工学会大会　学術講演論文集，pp. 1795-1798，2004. 9