

## 皮膚表面における温冷感・湿潤感の部位差を探る

文化女子大学 文化・衣環境学研究所  
田村 照子

### 1. はじめに

衣服や暖冷房は、人体の周囲に不均一な温熱環境を形成する。この皮膚表面の温熱情報は、皮膚の感覚受容器でキャッチされ、中枢に伝達・統合されることにより、自律性体温調節を駆動し、同時に温冷感・快適感を惹起する。人体各部に負荷される温熱刺激がヒトの体温調節や局所および全身温冷感や快適感にどのような影響を及ぼすかを追究するに当たって、その入り口である皮膚における感覚感受性の部位特性を把握することは、環境設計上重要と考えられる。著者らは、衣服設計の基礎とすべく、皮膚表面における温度感受性の部位差、人体の局所加温・局所冷却に対する生理反応、暑熱時の不快感に関連する湿潤感の感知構造、これらの加齢変化等について研究を継続してきたが、本稿ではこのうち温冷感の部位差・湿潤感の感知構造を中心に述べる。

### 2. 温点・冷点分布密度の部位差の探索

ヒトの皮膚には触・温・冷・痛の4つの感覚があること、皮膚の小さな領域を針、毛、温めたまたは冷やした真鍮の円錐の先で触れたとき、それぞれ痛・触・温・冷覚を生じる感覚点が存在すること、各感覚はそれぞれに固有の解剖学的構造を持つ受容器で受容されていることなどがHelmholz, Blix, von Frey等の研究者によって発見されたのは19世紀末のこと

である<sup>1)</sup>。von Freyの刺激毛による実験手法は現在も精神物理学の標準ツールとなっている。その後Dallenbach<sup>2)</sup>等によって冷点・温点密度の測定における、環境温度、刺激温度、刺激圧、負荷時間などの影響が検討された。現在、2cm×2cm枠内の100個の格子に微小な冷・温刺激を負荷し、冷・温感覚をマッピングする方法が確立されている。その後冷点密度についてはStrugholdとPorzによる1例の結果(岩村吉晃<sup>3)</sup>)が、また村田と入来<sup>4)</sup>の8部位における青年20人と老人30人の結果が報告されているが、温点密度についてはRein<sup>5)</sup>の報告しか見当たらない。

そこで著者らは改めて衣服設計の立場から、全身部位を対象とした調査に着手し、李と田村<sup>6)</sup>は、市販の温覚計に改良を加えた刺激装置を用いて若年女子9名の全身25部位を対象に冷点密度の測定を、また、田村と李<sup>7)</sup>は、刺激温度の微調整が可能な水循環式刺激装置(図1)を用いて、若年女子10名の全身25部位を対象に温点密度の計測を実施した。環境条件はいずれも人工気候室の気温 $28\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\pm 10\%$ 、気流 $0.2\text{m/sec}$ 以下、着衣条件はブラジャーとショーツ、姿勢は臥位、測定順序はランダムとした。測定部位は

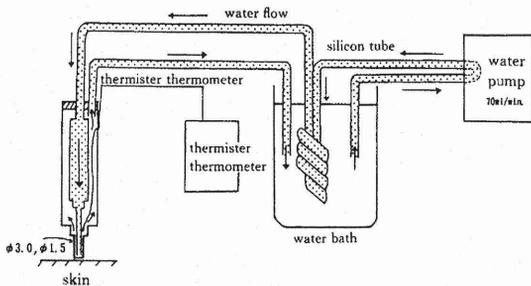


図1 花王型水循環方式温点測定装置

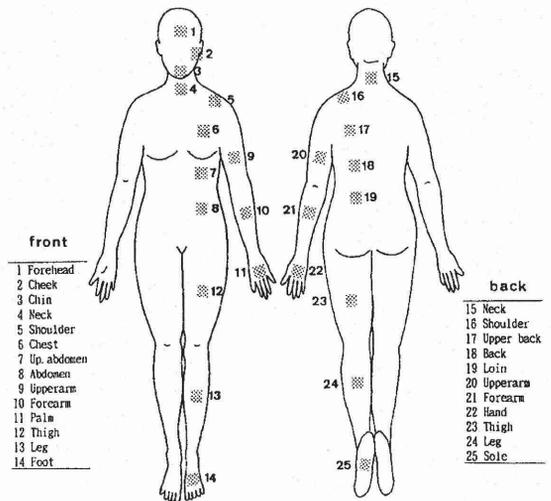


図2 温度点測定部位

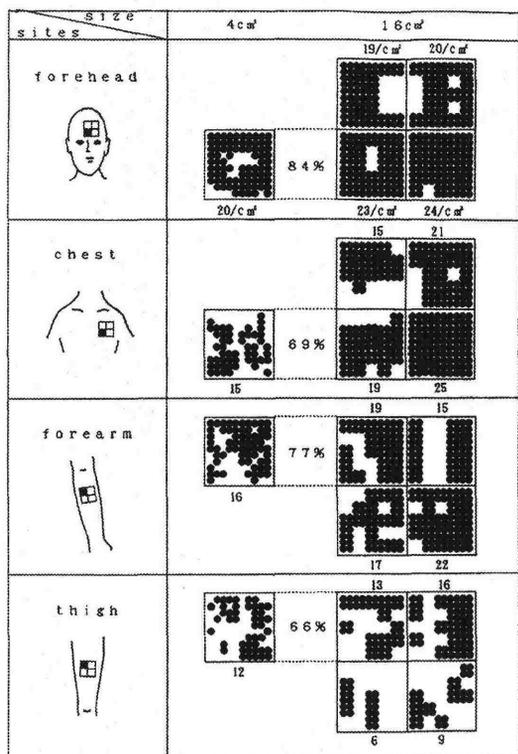


図3 2cm 枠 4cm 枠内冷点マッピング例

図2に示す通りである。

測定に先立って、2cm 枠におけるマッピング結果と同部分を含む4cm 枠におけるマッピング結果の再現性を確認した。前額・胸・前腕・大腿のマッピング結果を図3に示す。同一部位を繰り返しマッピングしたときの一致率を見ると、冷点では前額84%、胸69%、前腕77%、大腿66%と比較的高い再現性を示している。2cm 枠と4cm 枠の結果を比較すると、冷点は散在する点としてではなくあるまとまりのあるパターンとして存在することが確認された。冷点密度の測定面積としては現状の2cm 枠が妥当であるといえる。一方温点のマッピングでも一致率は69%から100%と高い。しかし温点は冷点に比して出現数が少ないため、少しの位置のずれが個人差や測定誤差を生じやすいことが示唆された。温点密度の測定には4cm 枠の利用が妥当かもしれない。冷・温点密度の結果を図4に示す。横軸の数字は図2に示す測定部位を表わしている。図の結果を見ると、冷点は8~23個/cm<sup>2</sup>に分布し、1の前額が最大、13の下腿が最小値を、全体としては顔面部、体幹部、頸部、上肢部、下肢部の順に低下した。温点は1~6個/cm<sup>2</sup>に分布し、冷点に比して約4分の1と少ないが、2の頬部と10の前腕部が比較的高い値を示している。日常生活にお

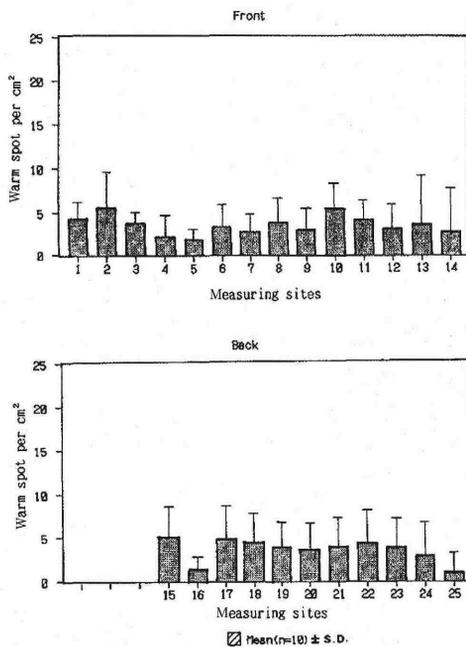
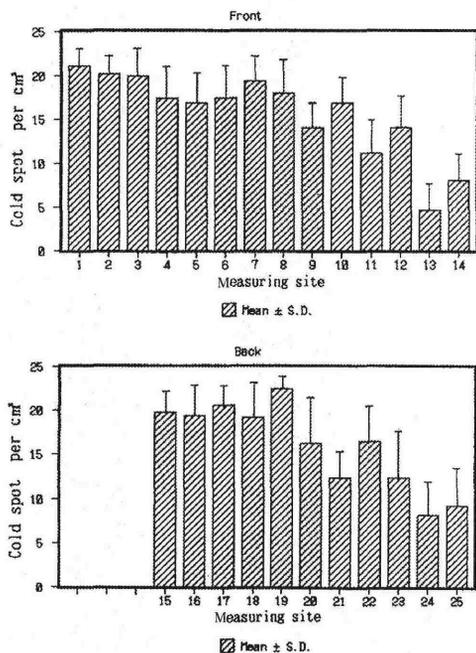


図4 人体各部の冷(左)温(右)点密度

いて、赤ちゃんのミルクの適温を調べる際哺乳瓶を頬に当てたり、沐浴の湯温を調べる際前腕を湯に浸したりする行為との関連を示す結果である。

### 3. 冷点・温点密度と冷・温感受性との関係

冷点・温点密度は、人体各部位の温度受容器の密度を反映すると考えられるが、各部位の温度感受性との関係はどうであろうか。生理学分野では赤外線放射や特殊冷却スーツを用いて人体の局所加温・局所冷却が引き起こす皮膚温・発汗・呼吸・代謝等生理反応への影響を調査した研究は見られるが、冷点・温点密度を調査した部位の温度感受性を調査した研究は見当たらなかった。そこで李と田村<sup>8)</sup>は、図5に示すような直径20mm、高さ108mmの鉄製プローブを用いて、サーストンの一対比較法による官能検査を実施した。10℃の恒温冷水中に放置したプローブを使用直前に2本取り出し、吸水シート上で水分を吸収させた後、異なる任意の部位に同時に3秒間接触させ、冷感覚がより強い部位を申告させた。同様の方法で、プローブを入れる恒温水槽の温度を40℃に調整することで温感受性の強さについても検討を加えた。測定部位は25部位、被験者は若年女子10名。測定条件は冷感受性における実験の環境気温を $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の2条件としたほかは前実験と同様である。いずれも前面・後面別にサーストンの方法に基づく距離尺度構成を行った。

各部位の冷感受性尺度構成値と、先に得られた冷点密度の関係を図6に示す。冷感受性は、前面では前額、頬、手掌、下腹が高く、下腿がもっとも低い。後面では項、腰が高く、下腿、前腕が低い。前・後面共に冷感受性の高い部位は、下腹、項、腰など、日常冷えを感じやすい、あるいは冷やしてはいけないとされている

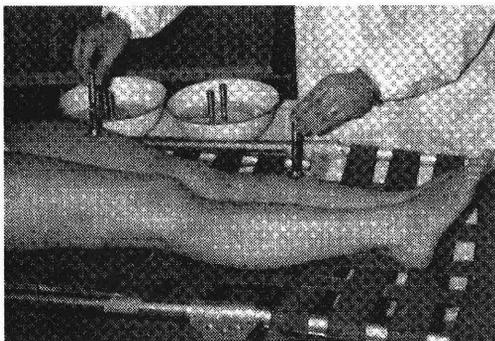


図5 部位別温度感受性の一対比較

る部位である。手掌と足底は四肢でありながら特異的に高い感受性を示した。冷点密度との相関は前面で $r = 0.61$ 、後面で0.40と高くはないが、全体の中で冷感受性が非常に高い手掌と足底の2部位を除くと $r = 0.7 \sim 0.8$ が得られ、両者間に危険率1%以下の有意な相関が認められた。有毛部と無毛部では表皮の構造や厚さが異なることが1因と考えられる。一方、温感受性も前額や頬・下腹で高く足部や下腿で低く、温点密度との相関は後面では0.70と高いが前面では0.42と低い結果となった。

一般に、温度感覚は中枢神経系にインパルスが十分な頻度で達したときのみ生じる。温点分布密度と温感受性の相関が低いことの理由としては、岩村<sup>9)</sup>が指摘するように、温点がない部位にも受容器がないわけではなく温点の数より受容器の数のほうが多いが、温覚が生じるには一度に広い面積が刺激されて複数の温度受容器の興奮による空間加重が起こる必要があると思われる。

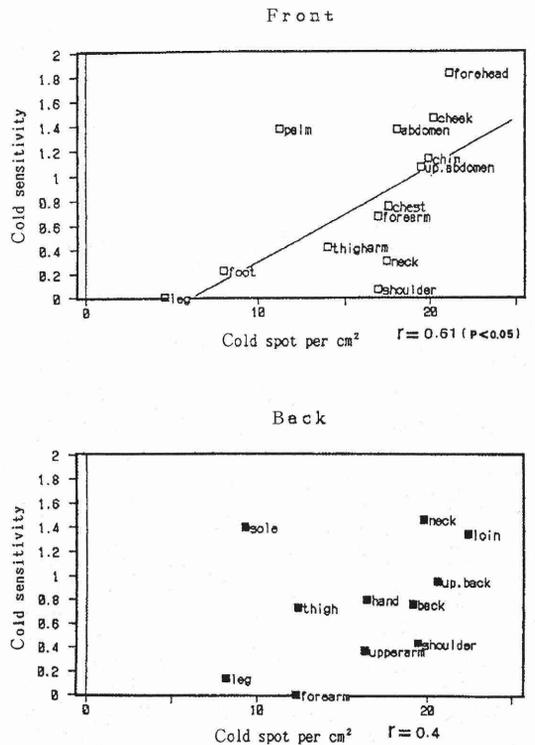


図6 冷点密度と冷感受性の関係

### 4. 温冷覚閾値測定装置の開発

以上、古典的な手法によって温度感覚の研究を進め

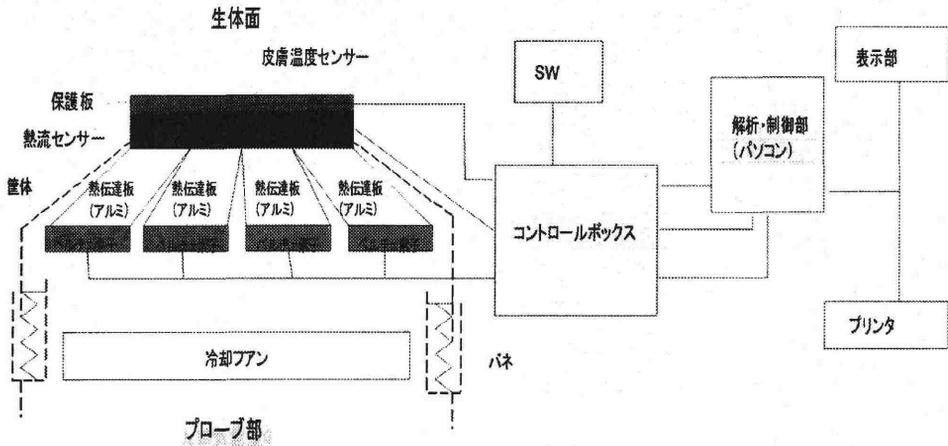


図7 温冷覚閾値測定装置の構成

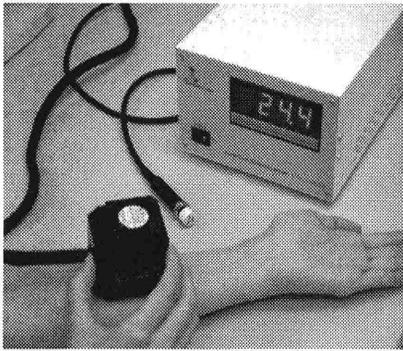


図8 温冷覚閾値実験風景

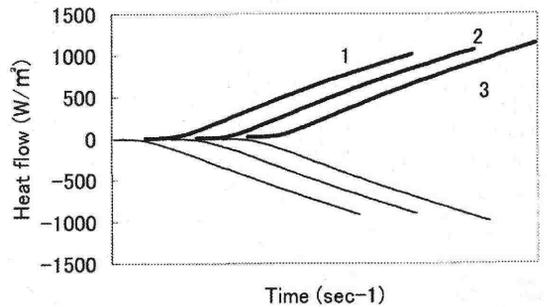


図9 繰り返し測定結果の例

てきたが、これらは測定に時間を要するばかりではなく、何よりも被験者への負担が大きい。今後、性別・年齢別に感覚特性を明らかにしようとするとき、測定方法の簡便化が最重要課題となった。そこで、より簡便で測定時間が短縮され被験者への負担が小さく、しかも高精度、再現性に優れた温冷覚閾値測定装置の開発を試みた。

田村と小田<sup>10,11)</sup>により開発された装置の構造を図7に示す。本装置はプローブ、サーマルコントローラ、解析制御部から構成されている。基本原理は、熱流センサーと温度センサーを組み合わせたセンサー部分の下に熱伝導板を配し、ペルチェ素子からの伝熱によって皮膚・プローブ間に熱流を発生させ、温度センサーにて皮膚温度を、熱流センサーにてプローブ・皮膚間の熱流値を出力するものである。まずプローブを対象

皮膚に接触させ、接触部のプローブ温度を当該皮膚温と等温レベルに調整した後、プローブ温を適当なスピードで（通常  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ）上昇または下降させ、被験者が温覚または冷覚を感じたときにスイッチボタンを押させる。このときの閾値を、温覚・冷覚独立に、しかも温度差、熱流量、熱流積分等によって多様に評価することができる。プローブからの熱流はコンパクトな空冷式で除去し、演算・データ表示・パラメータ設定等はコンピュータ制御することができる。図8に実験風景を、図9に繰り返し実験結果の例を示す。

### 5. 温・冷覚閾値の部位差とその加齢変化

開発した温・冷覚閾値測定装置を用いて、20歳代から80歳代までの各年代別温・冷覚閾値を、全面14部位、後面12部位計26部位について精査した。環境

条件・被験者の着衣・姿勢等は前実験条件と同様である。ここでは20歳代10名をコントロール群としたときの、60歳代10名、70歳代10名、80歳代8名の被験者群の冷覚閾値の結果(内田と田村<sup>12)</sup>)を示す。図10が示すように冷覚閾値の平均値は、20代若年女子で $-0.29 \sim -1.45^{\circ}\text{C}$ 、60代高齢女子で $-0.52 \sim -3.34^{\circ}\text{C}$ 、70代高齢女子で $-0.52 \sim -3.20^{\circ}\text{C}$ 、80代高齢女子で $-0.54 \sim -3.53^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布し、全体として若年女子に比べ高齢女子では冷覚閾値が増大している。全身の冷覚閾値の部位差をみると、若年女子、高齢女子群ともに、前額、頬、顎等顔面部の閾値は小さく、下腿、足背、足底等下肢部では大きく、体幹部・上部部では

顔面と下肢の中間的な値を示した。ただし肩部の冷覚閾値は例外的に大きい傾向がみられた。図中の\*、\*印は20代若年女子と高齢女子60代、70代、80代との間の多重比較の検定結果を部位別に示したものである。20代と60代では下腿前面の1部位で、20代と70代では腹部、下腿前面、下腿後面、足底の4部位で、20代と80代では腹部、上腕前面、下腿前面、足背、肩甲、腰、臀部、下腿後面、足底の9部位で有意差がみられ、年齢の上昇と共に有意な変化を示す部位が下腿・足部から全身へと拡大している。

温覚閾値についてもほぼ同様の結果が得られた。図11に、主な測定部位における温覚閾値の加齢変化お

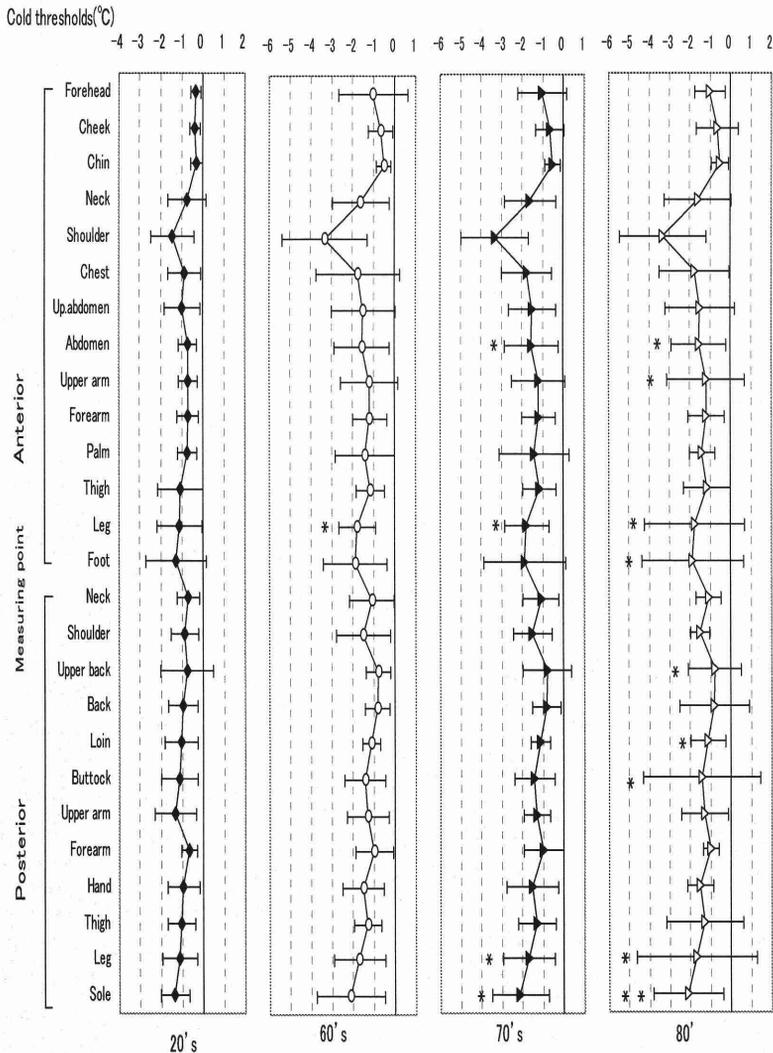


図10 年代別冷覚閾値の分布

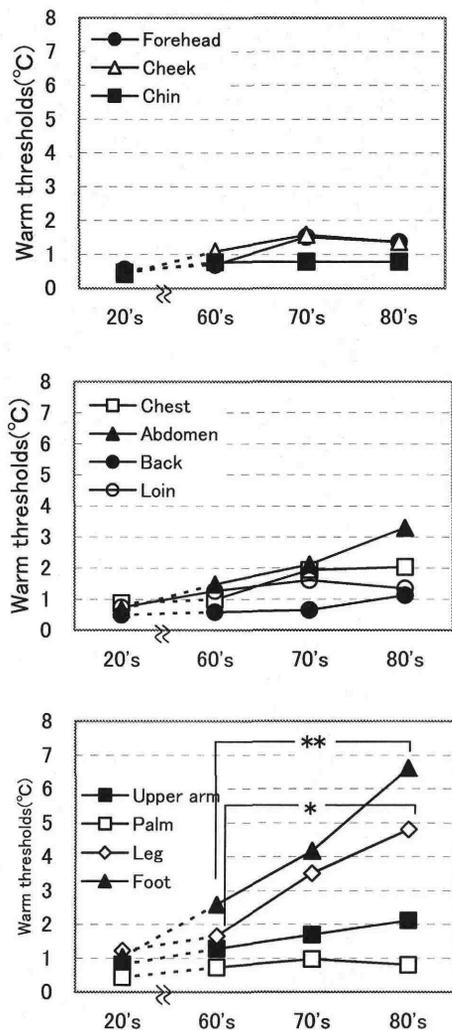


図 11 温覚閾値の加齢変化

および高齢女子 60 代、70 代、80 代間における有意差検定結果を示す。顔面部の前額、頬、顎では加齢による大きな変化はみられないが、躯幹部の胸部、腹部、腰部では加齢による温覚閾値の増加がみられ、四肢部での変化はさらに大となる。温覚閾値の変化がもっとも大きい足背では、20 代若年女子が平均 1.04°C で温覚を感じているのに比べ、60 代高齢女子は 2.59°C、70 代高齢女子は 4.17°C、80 代高齢女子は 6.61°C と閾値が顕著に増大し、60 代・80 代間でも 1% の有意差が認められた。

感覚閾値のエイジングについては既にいくつかの文献が見られる。Kenshalo<sup>13)</sup>は 27 人の若年者 (19~31

歳) と 21 人の高齢者 (55~84 歳) で温度検知閾値の上昇を認めている。また、Stevens と Choo<sup>14)</sup>は 18 歳から 88 歳の 60 人の被験者について、人体の 13 部位を対象に、ペルチェ刺激装置を用いて皮膚温を 33°C から 2.1°C/sec で上げるか 1.9 度/sec で下げた時の温度検知閾値を測定した。結果、温度感受性は部位により異なり 100 倍の差があること、顔と口が感度よく四肢で悪いこと、さらにどの部位でも冷覚の感受性のほうが良いが、冷感受性の良いところは温感受性も良いことを報告した。加齢変化については、温覚冷覚とも年齢と共に低下し、四肢特に足で著しく閾値が上がることで、感受性の減少は個人差が大きいことを指摘している。

今回の結果はこれら先行研究と基本的な傾向は一致している。しかし Stevens らの刺激装置は 33°C を基点としているが、皮膚温度は、人体各部位によって異なり、33°C では接触時にすでに温覚を生じる部位も多いと考えられ、閾値測定条件としては問題がある。また 2.1°C/sec、1.9°C/sec の変化速度は大きすぎる。特に高齢者では運動機能・反応速度の遅れがあるため、それによる見かけの閾値拡大が懸念される。これが 100 倍という大きな差異をもたらしたとも考えられる。

いずれにしても加齢に伴う温覚・冷覚の閾値低下は予想を超えるものであった。この原因としては、村田・入来が身体各部の皮膚の冷点は加齢により減少することを報告している。また岩村<sup>15)</sup>は皮膚温度受容器である温点、冷点の減少にくわえて、受容器から中枢神経感覚野に刺激が到達する神経伝達速度および神経の変化をあげている。触覚受容器のひとつであるマイスナー小体の分布密度が加齢と共に減少することが確認されていることから、今回得られた冷・温覚閾値の加齢変化は温度受容器の減少が一つの要因ではないかと考えられる。

Tochihara<sup>16)</sup>は高齢者における寒冷・暑熱暴露時の温熱反応から、高齢者では寒さに対する感受性に遅延があること、寒さの自覚のない高齢者では急激な血圧上昇や体温低下の危険があることを指摘している。寒さを自覚しにくい要因として、本研究における皮膚の温度感受性の低下が考えられ、その結果、高齢者では暑さ寒さに対する適切な行動がとりにくくなることが想定される。高齢者の衣服を設計する際には、この機能低下をカバーする方法の提案が必要である。また、日常生活における入浴時の高すぎる湯温設定、電気あんか、電気カーペット、使い捨てカイロ等による低温

やけどなども温度感受性の低下が要因と考えられ、高齢者の QOL 低下防止に向けては特に下肢部における温度感受性の低下を前提とした対策が必要である。

### 6. 温冷感と湿潤感

暑熱下では温冷感とともに湿潤感が問題となる。環境学のテキストには、衣服内湿度が60%以上では蒸れによる不快感を生じるため、衣服素材には吸湿・吸水・通気性が求められると記述されている。ところで、温冷覚にはそれぞれ対応する受容器があり、前述のような研究が可能であったが、湿潤を感知する受容器は、解剖学的にも生理学的にも発見されていない。人間はどのようにして湿潤感を感知しているのか、そのメカニズムを知ることは衣服設計上重要である。かつて Titchener<sup>17)</sup> とその弟子達は複雑な触覚体験をすべて温・冷・圧・痛の4つの古典的要素皮膚感覚で説

明しようとし、濡れた感じは圧と冷の合成であり、水分の有無は必須条件ではない、流動性は温度と圧の融合統合であると述べている。しかし、湿り気については記述がなく、また湿潤感を定量的に確認した研究は見当たらない。

そこで湿潤感覚の感知メカニズムを探る目的で、田村と小柴<sup>18)</sup> は、まず人工気候室の気温を 25・31・37℃それぞれ一定、相対湿度を 30%~80%に変化させた条件下に、成人女子 24 名を滞在させ、その間の全身温冷感と全身湿り感を申告してもらった。また気温 31℃下の同様条件下で乾燥空気を吸入させる実験を追加した。結果は図 12 が示すように、全身湿り感では室温の上昇とともに上昇し、乾燥空気を吸入させた場合は湿潤感の上昇抑制が観察された。また別の実験で小柴と田村は、直径 3cm のカプセル内に相対湿度 10%~90%に調湿された空気を流通させ皮膚に接触させたとき、皮膚面でその湿度の差を感知することができるか否かに関する官能検査を、湿度変動法および一対比較法を用いて実施した(図 13)。被験者は 3 名、対象部位は 6 部位である。結果、湿度差をわずかでも感知しえたのは手掌のみで、他の部位では 10%と 90%の湿度差があっても、一人の被験者も感知しえなかった。さらに小柴と田村<sup>19)</sup> は、皮膚の濡れ感の支配要因を探る目的で、人体表面に、面積の異なる濡れた濾紙、および水温・水量・荷重の異なる濡れた綿メリヤス布を接触あるいは移動させた際の濡れ感の変化を測定し、濡れ感の最大要因は接触部皮膚の温度と熱流変化であること、濡れ感の強弱には触覚が関与することを明らかにした。

これらの結果を総合すると、皮膚表面では、水分そのものの存在を感知することはできず、私たちが感じる湿潤感は、水分の存在に伴う触感の変化、皮膚表面と環境の水蒸気圧差によって生じる水分移動の程度、およびその蒸発潜熱に伴う皮膚の温度変化速度などの

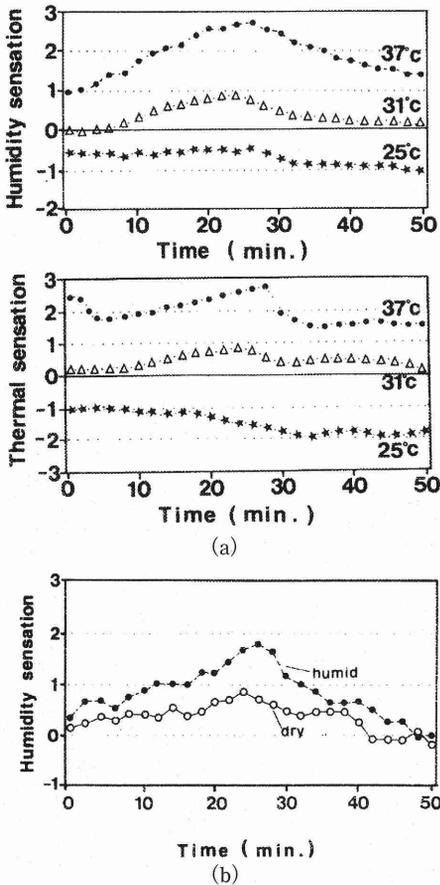


図 12 気温一定で変化する湿度条件曝露時の湿潤感・温冷感変化 (a) 乾燥空気吸入による湿潤感の抑制 (b)

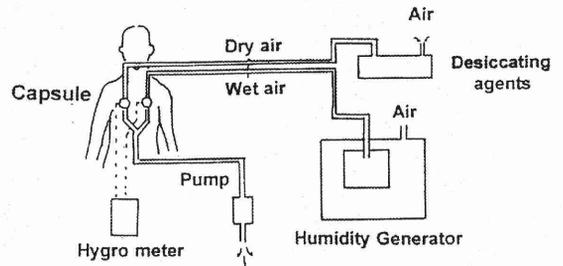


図 13 局所湿り感覚の一対比較装置

総合感覚であると考えられた。また、全身の湿潤感には、著者の提案する湿り快適指数、すなわち人体と環境との間の体熱平衡から要求される蒸発放熱量 (Ereq) と人体からの実際の蒸発放熱量 (Esk) の比が大きく関与することが示唆された。

## 7. おわりに

今から 40 年以上前のことになるが、文化女子大学への着任を機に、筆者はそれまで従事していた人体の解剖学的な構造やこれに適した衣服パターンの研究から、気候に適した機能衣服設計の研究へと方向転換を余儀なくされた。そこで改めて考えたことは、他の哺乳動物と違って人間しか衣服を着ていないのはなぜだろう？人間が裸で過ごせる気候範囲はどの程度で、もし道徳的な配慮がいらないとすると、各種気候下の衣服はどのようにあるべきか？寒いときの保温のツボ、暑いときの冷却のツボはあるのか？冬に露出している顔は寒くないのに衣服で包まれている体幹部が寒いのはなぜか？等々の疑問であった。

以来、衣服というより、人間の温熱生理特性研究を主要テーマのひとつとして今日に至っているが、地球温暖化が急速に進行する現在、その対応策としての省エネルギー型個別空調への要求から、改めて、人体表面の部位別温冷感・湿潤感に関する研究が見直されている。近年の精神物理学や神経生理学の進展は目覚しく、現在温冷覚に関わる受容器も複数存在することが明らかにされている。今後はそれらの知見を視野にさらなる研究が進められることを願っている。

## 文献

- 1) 岩村吉晃：「タッチ」医学書院，7 (2003)
- 2) Dellenbach, K. M. : The temperature spots and end organs, *J. Neurophysiol.*, 39, 402~427 (1927)
- 3) 岩村吉晃：体性感覚野の階層構造，*科学*, 53, 214-220 (1983)
- 4) 村田成子，入来正躬：老人の体温-皮膚感覚分布頻度に及ぼす加齢の影響，*日本老年医学会雑誌*, 11, 157-163 (1974)
- 5) Rein, F. H. : Uber die Topographie der Warmemphindung. Beziehungen zwischen Innervation und Receptorischen Entorganen. *Z. Biol.* 82, 515-535 (1925)
- 6) 李 旭子，田村照子：人体表面の温度点分布 (第 1 報) 冷点分布密度の部位差，人間と生活環境，2-1, 30-36 (1995)
- 7) 田村照子，李 旭子：人体表面の温度点分布 (第 2 報) 温点分布密度の部位差，人間と生活環境，2-1, 37-42 (1995)
- 8) 李 旭子，田村照子：ヒトの冷感受性の部位差について，*日本家政学会誌* 46-11, 1081-1090 (1995)
- 9) 岩村吉晃：「タッチ」医学書院，20 (2003)
- 10) 飯野理恵，田村照子，小田一之：人体の部位別温冷覚閾値計測の試み，*日本生理人類学会誌*，4-特別号 (1999)
- 11) 田村照子，内田幸子，岩崎房子，小田一之：汎用型温冷覚閾値測定装置の開発と応用，第 25 回人間-生活環境系シンポジウム，175-178 (2001)
- 12) 内田幸子，田村照子：高齢者の皮膚における温度感受性の部位差，*日本家政学会誌*，58-9, (2007)
- 13) Kenshalo, D R : Somesthetic sensitivity in young and elderly humans, *J Gerontol.* 41, 732-742 (1986)
- 14) Stevens JC, Choo KK : Spatial acuity of the body surface over the life span, *Somatosens Mot Res* 13, 153-166 (1996)
- 15) 岩村吉晃：「タッチ」医学書院，20 (2003)
- 16) Tochihara, Y., Ohnaka, T., Nagai, Y., Tokuda, T., and Kawashima, Y. : Physiological responses and thermal sensations of the elderly in cold and hot environments. *J. Therm. Biol.* 5/6 18, 355-361 (1993)
- 17) 岩村吉晃：「タッチ」医学書院，9 (2003)
- 18) 田村照子，小柴朋子：人体の湿り感覚 (第一報) 全身の湿り感覚感受性，*繊維製品消費科学*，36-1, 125-131 (1994)
- 19) 小柴朋子，田村照子：皮膚濡れ感覚の支配要因，*繊維製品消費科学*，36-1, 119-124 (1995), 5-131 (1994)