Influence of the Subjective Thermal Sensitivity and Cooling Temperature on the Psychological and Physiological Local Cooling Response

HORIBA Yosuke^{a,*}, ENDO Shinya^b, KAMIJO Masayoshi^b, INUI Shigeru^a, TAKATERA Masayuki^a,
SHIMIZU Yoshio^a

^a Faculty of Textile Science and Technology Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano 386-8567, Japan

^b Graduate School of Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano 386-8567, Japan

Received 24 January 2011; accepted for publication 16 November 2011

Abstract

To acquire basic knowledge about local cooling and thus achieve energy saving and comfortable clothing design, we measured the thermal sensation, mean skin temperature, and tympanic temperature under various local cooling temperatures between groups of varying subjective thermal sensitivity and investigated the effect of cooling temperature and subjective thermal sensitivity on the psychological and physiological response in local cooling. The results obtained were summarized as follows: The scores for general thermal sensation were close to a thermally neutral environment and the mean skin temperature decreased and the tympanic temperature increased with decreasing cooling temperature in a hot environment. The thermal sensation at the local cooling parts tended to change from a sensation of warmth form one of cold with decreasing cooling temperature. The general thermal sensation of the group with nonsusceptibility to heat was close to a thermal neutral environment with decreasing cooling temperature, while that of the group with susceptibility to heat remained almost constant. The pattern of tympanic temperature, however, was opposite to the general thermal sensation. The thermal sensation, skin temperature at the local cooling parts and the mean skin temperature were mainly affected by cooling temperature rather than the thermal sensation.

Key Words: Local cooling, Subjective thermal sensitivity, Thermal sensation, Skin temperature, Tympanic temperature

局所冷却時の心身反応における主観的温度感受性と冷却温度の影響

堀場洋輔^{a,*}, 遠藤慎也^b, 上條正義^b, 乾 滋^a, 高寺政行^a, 清水義雄^a

^a 信州大学繊維学部, ^b 信州大学大学院

1. 緒 言

地球温暖化をはじめとする地球環境問題は人類にとって喫緊の課題であり、我が国においても2020年までに温室効果ガス排出量を1990年比で25%削減することを目標に掲げ、チャレンジ25キャンペーン（旧チーム・マイナス6%）[1]やCDM（クリーン開発メカニズム）事業[2]など官民一体となった取り組みが展開されている。その中で繊維分野に関連した取り組みとしては、2005年度から開始されたクールビズ・ウォームビズが広く知られている。これらの取り組み

は厳密には衣環境のみならず食・住環境における活動も含まれるが、一般的には夏季はノーネクタイやノージャケットなどの軽装により冷房温度を28℃とし、冬季はスリーベイス・スーツなど保温性の高い服装により暖房温度を20℃に設定することで冷暖房による二酸化炭素排出量を削減するキャンペーンである。キャンペーンを推進する環境省によると平成19年度のクールビズによる二酸化炭素排出削減量は推計約140万トンと試算されている[3]。身近で簡易な地球温暖化防止対策として官公庁を中心に定着しつつあるクールビズ・ウォームビズであるが、一方では、特にオフィス環境における冷暖房設定温度の緩和が温熱快適性の低下を招き、

* 連絡先：信州大学繊維学部創造工学系 386-8567 長野県上田市常田 3-15-1,
E-mail: horiba@shinshu-u.ac.jp, Tel: +81-268-24-0028, Fax: +81-268-24-5511

作業効率の低下につながるといった指摘もあり [4,5], 省エネルギー性と温熱快適性・作業効率性との両立が重要な課題となっている。

そのような背景から近年, 省エネルギー性と快適性・作業効率性という対立する2つの課題を解決する方法の1つとして, 局所空調が注目されている。局所空調は空間を作業領域とそれ以外の周辺領域に分け, 作業領域を集中的に加温・冷却する空調方式であり, 空間全体で均一な従来の空調方式に比べ効率的な冷暖房が期待されることから, 特に建築分野において盛んに研究が行なわれている [6-8]。ただし, 建築分野では冷暖房機器の利用を前提としているため, 局所気流暴露による対流伝熱が心身反応へ与える影響を調査した研究が大半である。これに対して繊維(被服)分野では, 身に纏うという被服特有の性質に着目し, 温熱刺激を皮膚に直接与える伝導伝熱による心身反応への影響や, 局所空調に比べ更に局所的な衣服内空間の加温・冷却の影響について研究が進められている。李らは冷感受性の部位差を検証するため, 気温25℃と30℃の室内において, 10℃の冷水中で冷却した直径20 mmの鉄製プローブを用い, 全身25部位に3秒間の冷刺激を与えた結果, 冷感受性には部位差があり, 体幹部, 上肢, 下肢の順に冷感受性が高いことを報告している [9]。西原は熱的中立時における局所冷刺激に対する心身反応を検証するために, 気温30℃の室内において18℃に冷却された衣服を用いて90分間の局所冷却曝露実験を行なった結果, 冷却衣服により全身の快適感が向上し, 高温環境下でも熱的受容度が高くなることを報告している [10]。中村らは気温34℃の室内において, ビニールチューブをつなぎ合わせた水冷装置に25℃の水を流し, 頸部, 腹部, 手部, 足底部の4部位に対して90秒間の局所冷却を行なったところ, 頸部冷却は全身の不快感を最も軽減し, 腹部, 手部, 足底部の冷却は不快感軽減の効果がほとんど見られなかったことを報告している [11]。

しかしながら, これまでの研究は局所冷却の有無による心身反応の違いや冷却部位の影響を検証したものが多く, 省エネルギー性の面で重要な冷却温度による効果の違いについて検証した例は少ない。また, 体温調節反応や温熱快適性においては「暑がり, 寒がり」などの温度感受性の影響を受けることが報告されているが [12], 温度感受性の違いによる局所冷却への影響を調査した先行研究も乏しい。そこで, 本論文では, 主観申告に基づき「暑がり・非暑がり」の2群に分類した被験者群に対して冷却温度の異なる3種類の局所冷却を行ない, 冷却温度および温度感受性の違いが局所冷却時の心身反応に与える影響について検討する。なお, 本稿では皮膚等の温度受容器に基づく「温度感受性」との混乱を避けるため, 温熱刺激に対する主観申告に基づいて分類される「暑がり, 寒がり」等の温熱感覚を「主観的温度感受性」と定義する。

2. 実験

2.1 局所冷却条件

暑熱環境(気温34℃, 相対湿度50%)における局所冷却に対する冷却温度の影響を明らかにするために, 15℃, 20℃, 25℃の3条件を冷却温度として設定し, 対象部位はFig. 1の腋窩部, 背部, 胸部, 前腕部, 腰部, 鼠径部, 下腿部の計7部位とした。実験には比較的小型で精密な温度制御を行えることから, ペルチェ式冷却システム(高木製作所製PS-50W)を使用し, 伝導伝熱による局所冷却を行なった。システムの構成をFig. 2に示す。温度制御に当たっては, ペルチェユニット(PU-50W, サイズ: 6×6 cm)の表面温度をK型熱電対で検出し, 温度コントローラ(理化学工業製SA100, 精度: $\pm(1\%rdg + 1dig)$)によるPID制御を行なった。局所冷却の際には, 伸縮性ベルト(幅2 cm, ナイロン製)およびサージカルテープを用いて皮膚表面にペルチェユニットを直接装着した。なお, 皮膚表面に40 gf/cm²以上の圧力が加わると血流障害により皮膚表面温度が低下することが報告され

Fig. 1 Cooling parts.

Fig. 2 Outline of the local cooling facility.

ていることから [13], エアパック式圧力計 (エイエムアイ・テクノ製 A0101-G35k) を用いてベルチェユニットの接触圧が 30 gf/cm^2 未満になるように装着した。

2.2 被験者

主観的温度感受性の違いによる局所冷却効果への影響を調査するために、被験者を「暑がり傾向」と「非暑がり傾向」に分類した。分類にあたっては山崎らの方法 [14] を参考に、以下の手順で実施した。まず、21～23 歳の健常な男子大学生 16 名に、上肢に T シャツ、下肢に下着とショートパンツを着用させ、気温 24°C 、相対湿度 50% に調整された人工気候室で 30 分間の椅座安静状態にした。30 分間の安静後に、実験室内の温度を 24°C から 29°C まで 60 分間に渡り直線的に漸増させ (相対湿度は 50% に固定)、その際の全身の温熱感覚を 11 段階の評定尺度法 (-5 : 寒い, -4 : やや寒い, -3 : 涼しい, -2 : やや涼しい, -1 : ほんのわずかに涼しい, 0 : どちらでもない, $+1$: ほんのわずかに暖かい, $+2$: やや暖かい, $+3$: 暖かい, $+4$: やや暑い, $+5$: 暑い) により 5 分間隔で評価させた。分類では評価結果を基に、昇温期間を通して評点が 0 以上の者、あるいは昇温開始後 10 分以内に負であった評点が 0 以上に転じた被験者を「暑がり傾向」とし、それ以外の被験者を「非暑がり傾向」とした。その結果、16 名のうち 6 名が暑がり傾向を、残りの 10 名が非暑がり傾向を示し、この中の各群 6 名を局所冷却実験の被験者として採用した。なお、温熱感覚における体型の影響の有無を確認するために、両群の体重と BMI の平均値の差の検定を行なったところ、体重、BMI のいずれにおいても両群に有意差は認められなかった (Table 1)。

2.3 実験プロトコル

暑熱環境を想定した気温 34°C 、相対湿度 50% の人工気候室内で Fig. 3 の実験プロトコルに従い、局所冷却実験を行

Table 1 Comparison of weight, height, and BMI between groups of varying subjective thermal sensitivity.

	Heat	Non Heat
Weight (kg)	59.4 ± 7.3	59.0 ± 7.0
Height (m)	1.716 ± 0.043	1.743 ± 0.043
BMI	20.2 ± 2.9	19.4 ± 2.2

Fig. 3 Experimental protocol.

なった。まず、上肢に半袖 T シャツ、下肢に下着およびショートパンツを被験者に着用させ、実験環境に順応させるために実験室内で 30 分間の椅座安静状態にした。30 分間の安静後に、30 分間の局所冷却を行ない、皮膚表面温度を 1 分間隔で、鼓膜温度を 5 分間隔で計測し、同時に温熱感覚を 5 分間隔で評定尺度法により評価させた。実験は被験者内実験とし、1 回の実験では 21 (= 冷却温度: 3 水準 $\times$ 冷却部位: 7 水準) の冷却条件の中から 1 条件を実施し、30 分以上の間隔を空けて 1 日当たり 2～4 条件を実施した。また、統制条件として、局所冷却を行わない場合についても温熱感覚と体温の計測を行なった。なお、食事直後は食事誘発性産熱反応により代謝が亢進し、体温が一時的に上昇する場合があることから、食後は 2 時間以上の間隔を空けて実験を行なった。また、順序効果を避けるために、冷却条件の実施順序は被験者ごとに無作為化した。実験の実施期間は 2009 年 11 月～2010 年 1 月であった。なお、被験者には実験の趣旨について予め口頭で説明し、同意を得た上で実験を実施した。

2.4 計測評価項目

2.4.1 温熱感覚の評価

局所冷却時の冷却部位ならびに全身の温熱感覚を調査するために、評定尺度法を用いて官能検査を実施した。官能検査では 7 段階尺度 (-3 : 非常に寒い, -2 : 寒い, -1 : やや寒い, 0 : どちらでもない, $+1$: やや暑い, $+2$: 暑い, $+3$: 非常に暑い) を用い、5 分毎に口頭で被験者に回答させた。なお、温熱感覚は皮膚の温冷受容器によって検出される「温度感覚」と、皮膚の温度受容器と深部温度に基づき高次中枢で決定される主観的な「温熱感覚」に区別されるが [15], 本研究では後者の主観的な温熱感覚を調査するために上記の温熱感覚スケールを用いている。主観的な温熱感覚においては暑さや寒さを感じない熱的中立状態が快適状態と定義されていることから、本研究で用いる評価尺度において評点: 0 (どちらでもない) が温熱的に快適な状態を意味し、評点の絶対値が増大するにしたがい温熱的に不快な状態であることを示している。

2.4.2 皮膚表面温度・鼓膜温度計測

局所冷却の生理機能への影響を明らかにするために、皮膚表面温度と、深部温度を反映する指標の 1 つである鼓膜温度の計測を行なった。皮膚表面温度計測は、Fig. 1 の局所冷却を行なった 7 部位 (前腕部、下腿部、腋窩部、背部、胸部、腰部、鼠径部) と、平均皮膚表面温度の算出に必要な 5 部位 (前額部、腹部、手背部、大腿部、足背部) を加えた合計 12 部位に対して 1 分間隔で実施した。計測にはデジタルサーミスタ温度計 (神栄テクノロジー製 TRH-7X) と温湿度データロガー (ティアンドデイ製 TR-71) を使用し、温度センサーはサージカルテープにより各部位に直接貼り付けた。一方、鼓膜温度の計測はサーモパイル型耳式体温計 (オムロン製

MC-505)を用い、右耳で5分毎に実施した。なお、皮膚表面温度については、計測した各部位の温度から Hardy-DuBois の7点法 [16] に基づき式(1)より平均皮膚表面温度 T_{sk} を算出し、皮膚表面温度の指標とした。なお、式(1)において、 T_1 は前額部、 T_2 は腹部、 T_3 は前腕部、 T_4 は手背部、 T_5 は大腿部、 T_6 は下腿部、 T_7 は足背部の皮膚表面温度である。

$$T_{sk} = 0.07T_1 + 0.35T_2 + 0.14T_3 + 0.05T_4 + 0.19T_5 + 0.13T_6 + 0.07T_7 \quad (1)$$

2.5 統計処理

本研究で実施した実験は、1つの被験者間要因（主観的温度感受性）と2つの被験者内要因（冷却温度、冷却部位）から成る混合計画である。したがって、実験結果に対する統計学的検定には混合計画3要因分散分析を用い、要因の主効果が認められた場合は Fisher の最小有意差法による多重比較検定、交互作用が認められた場合は単純主効果の検定と Fisher の最小有意差法による多重比較検定を行なった。なお、本研究においては帰無仮説の成立する確率が5%以下の場合を「統計的有意差あり」、5%を越え、10%以下の場合を「統計的有意差はないが、有意傾向あり」と定義し、結果を分析した。また、本研究では局所冷却時の心身反応に対する冷却温度と主観的温度感受性の影響を明らかにすることを目的としていることから、冷却部位の影響については本報では触れないが、部位による温度感受性の違いが全身の温熱感覚に影響を及ぼしている可能性も推察されることから、改めて別報で論じる予定である。

3. 実験結果

3.1 温熱感覚

ここではまず、局所冷却温度と温熱感覚に関する結果について示す。Fig. 4(a)は局所冷却における各冷却温度（15℃、20℃、25℃、無冷却）に対する全被験者の冷却暴露30分間の全身の温熱感覚の平均値と標準誤差を示したものであり、いずれの条件においても評点は正（やや暑い～暑い）であったが、冷却温度の低下に伴い評点（暑熱感）が低下する傾向が見られた。なお、温熱感覚の時間的変化については、いずれの冷却温度においても冷却暴露30分間を通して顕著な変化は観察されず、分散分析による有意差検定においても冷却暴露時間の主効果は認められなかった。一方、Fig. 4(b)は全被験者の冷却暴露30分間の冷却部位における温熱感覚の平均値と標準誤差を冷却温度別に示したものであり、無冷却時には評点が正（やや暑い～暑い）であった冷却部位の温熱感覚は局所冷却により評点が負（やや寒い～寒い）に遷移し、冷却温度の低下に伴い冷感が強まる傾向が見られた。

次に、主観的温度感受性別の局所冷却時（30分間）の全身の温熱感覚の平均値と標準誤差を Fig. 5(a)に示す。Fig. 5(a)を見ると、暑がり傾向の被験者群と非暑がり傾向の被験

Fig. 4 Relationship between thermal sensation and cooling temperature.

者群で全身の温熱感覚に違いがあり、無冷却時に相対的に高い評点であった非暑がり傾向の被験者群では局所冷却によって評点が低下し（暑熱感の緩和）、冷却温度15℃においては暑がり傾向の被験者群と殆ど違いがないことが確認された。また、無冷却時において全身の温熱感覚が異なっていることを考慮すると、局所冷却の影響以前に環境温に対する全身の温熱感覚がそもそも被験者群間で異なっていた可能性が考えられることから、局所冷却のみの影響を明らかにするために、無冷却時における全身の温熱感覚の評点に対する局所冷却時の変化量、すなわち被験者群ごとに局所冷却時の評点から無冷却時の評点を減算した結果が Fig. 5(b)である。Fig. 5(b)では縦軸の値が0の場合は局所冷却時の全身の温熱感覚が無冷却時と変化がなく、正の場合は無冷却時に比べ暑熱感が強まり（暑く感じ）、負の場合は暑熱感が弱まっている（涼しく感じている）ことを意味している。Fig. 5(b)を見ると、

(a) General thermal sensation.

(b) General thermal sensation variation by local cooling.

(c) Thermal sensation at cooling parts.

Fig. 5 Relationship between thermal sensation and subjective thermal sensitivity.

非暑がり傾向の被験者群はいずれの冷却温度においても変化量が負であり（無冷却時に比べ涼しく感じている）、冷却温度の低下と共に無冷却時に比べ暑熱感が緩和される傾向が見られた。一方、暑がり傾向の被験者群では、いずれの冷却温度においても変化量が負値を示しているものの、非暑がり傾向の被験者群に比べ変化量は有意に小さく、また、冷却温度間で変化量に有意差は認められなかった。以上のことから、主観的温度感受性の違いにより局所冷却に対する全身の暑熱感覚は異なる傾向を示し、非暑がり傾向の被験者群に比べ暑がり傾向の被験者群の全身の暑熱感覚は変化しにくい傾向であることが示唆された。一方、冷却部位の暑熱感覚については主観的温度感受性による違いは見られず、いずれの被験者群でも冷却温度の低下と共に冷感が強まる傾向が見られた（Fig. 5(c)）。

以上の結果から、局所冷却時の全身の暑熱感覚は冷却温度と主観的温度感受性による影響を受けている可能性が見られ、翻って、冷却部位の暑熱感覚については主観的温度感受性による違いは殆どなく、冷却温度にのみ影響される可能性が示唆された。特に、冷却部位では主観的温度感受性による違いが認められなかったにもかかわらず、全身の暑熱感覚は主観的温度感受性によって異なるという興味深い傾向が明らかになった。

3.2 皮膚表面温度

本研究では皮膚表面温度の計測を前述の12部位で行なったが、ここでは局所冷却による皮膚表面温度の全体的な変動を確認するために、式(1)より算出した平均皮膚表面温度と、冷却部位の皮膚表面温度の結果について示す。Fig. 6(a)は局所冷却温度の各水準に対する全被験者の冷却暴露30分間の平均皮膚表面温度の平均値と標準誤差を示したものである。平均皮膚表面温度に対する検定の結果、無冷却時に比べ局所冷却時の平均皮膚表面温度は有意に低く、また、冷却温度の低下に伴い平均皮膚表面温度は低下する傾向が見られた。一方、Fig. 6(b)は局所冷却温度の各水準に対する全被験者の冷却暴露30分間の冷却部位における皮膚表面温度の平均値と標準誤差を示したものである。平均皮膚表面温度と同様に、無冷却時に比べ局所冷却時の冷却部位の皮膚表面温度が有意に低く、また、冷却温度の低下に伴う冷却部位の皮膚表面温度の低下が認められた。

次に、主観的温度感受性と平均皮膚表面温度に関する結果について示す。Fig. 7(a)は平均皮膚表面温度を主観的温度感受性別に示したものである。非暑がり傾向の被験者群に比べ暑がり傾向の被験者群の平均皮膚表面温度は相対的に低い傾向が見られたが、無冷却時においても両群で違いが見られたため、全身の暑熱感覚と同様に無冷却時に対する平均皮膚表面温度の変化（Fig. 7(b)）を求めた。その結果、両群に統計的有意差は認められなかった。また、冷却暴露30分間の平均皮膚表面温度の時間変化（冷却開始30分後の平均皮膚表面温度から冷却開始1分後の平均皮膚表面温度を減算した値）においても両群に有意差は確認されなかった。以上のこ

Fig. 6 Relationship between skin temperature and cooling temperature.

とから、局所冷却に対する平均皮膚表面温度は主観的温度感受性による影響は少なく、いずれの被験者群においても冷却温度の低下と共に平均皮膚表面温度が低下する傾向であることが示唆された。一方、Fig. 7(c)は冷却部位の皮膚表面温度を主観的温度感受性別に示したものであり、冷却温度 20°C で主観的温度感受性の違いによる有意差が認められたものの、全体的には暑がり傾向の被験者群と非暑がり傾向の被験者群の間に殆ど違いは見られず、平均皮膚表面温度と同様に冷却温度の低下と共にいずれの被験者群でも冷却部位の皮膚表面温度が低下する傾向が見られた。

以上の結果から、局所冷却時の平均皮膚表面温度および冷却部位の皮膚表面温度は主観的温度感受性による影響は少なく、冷却温度にのみ影響を受けている可能性が示唆された。

Fig. 7 Relationship between skin temperature and subjective thermal sensitivity.

Fig. 8 Relationship between tympanic and cooling temperatures.

3.3 鼓膜温度

冷却温度の各水準に対する全被験者の冷却暴露 30 分間の鼓膜温度の平均値と標準誤差を Fig. 8 に示す。鼓膜温度に対する検定の結果、無冷却時に比べ 15°C で局所冷却した際の鼓膜温度は有意に高く、また、冷却温度が低下するにしたがい鼓膜温度が上昇する傾向が見られた。一方、局所冷却時の鼓膜温度を主観的温度感受性別に示したものが Fig. 9(a) である。検定の結果、非暑がり傾向の被験者群に比べ、暑がり傾向の被験者群の鼓膜温度が相対的に低い傾向が見られたが、無冷却時においても両群の鼓膜温度が異なっていたことから、温熱感覚の結果と同様に、局所冷却の影響以前に両群で鼓膜温度が異なっていた可能性が考えられる。そこで、温熱感覚の場合と同様に、局所冷却の鼓膜温度への影響を確認するために無冷却時の鼓膜温度に対する冷却時の鼓膜温度の変化量を算出した結果が Fig. 9(b) である。Fig. 9(b) においては、縦軸の値が 0 の場合は冷却時の鼓膜温度が無冷却時と等しく、正の場合は無冷却時に比べ冷却時の鼓膜温度が上昇しており、負の場合は無冷却時に比べ冷却時の鼓膜温度が低下していることを意味している。Fig. 9(b) より、非暑がり傾向の被験者群に比べ、暑がり傾向の被験者群においては局所冷却に対する鼓膜温度の上昇幅が有意に大きい傾向が見られた。なお、鼓膜温度の変化量と冷却温度の関係については、いずれの被験者群においても冷却温度の低下に伴い鼓膜温度の変化量が増大（無冷却時に比べ上昇）する傾向が見られた。

以上の結果から、局所冷却時の鼓膜温度は冷却温度と主観的温度感受性に影響を受けている可能性があることが示唆された。

4. 考 察

局所冷却における冷却温度の影響について、冷却温度の低下に伴い冷却部位皮膚表面温度ならびに平均皮膚表面温度は有意に低下し、鼓膜温度は有意に上昇した。これらは人体各部に対する局所冷却時に皮膚表面温度が低下し、鼓膜温度が

(a) Tympanic temperature.

(b) Tympanic temperature variation by local cooling.

Fig. 9 Relationship between tympanic temperature and subjective thermal sensitivity.

一過性の上昇を示すとする田村の報告 [17] や、無冷却時に比べ頭部冷却時の平均皮膚表面温度が低下するという物部らの報告 [18] と一致するものであった。一般に環境温が 29°C 以上の暑熱環境においては交感神経の抑制により皮膚血管が拡張され、皮膚血流量の増加に伴う皮膚表面温度の上昇と発汗、さらに産熱の抑制により全身の熱放散が促進されることが知られている [19]。本研究においても、無冷却時には対暑反応の 1 つとして、Fig. 6(a) で見られたような皮膚血流量の増加や発汗が原因と思われる平均皮膚表面温度の上昇や、Fig. 8 で見られたような産熱の抑制の影響と思われる深部温度の指標である鼓膜温度の低下が確認された。それに対して局所冷却時には、無冷却時に比べ平均皮膚表面温度が低下し、鼓膜温度が上昇する傾向が見られたことから、局所

冷却の効果によって身体への暑熱負荷が低減され、皮膚血流量の増加、熱産生の減少等の主要な放熱反応が抑制されたことが示唆される。一方、温熱感覚においては、冷却温度の低下に伴い全身の温熱感覚が僅かながら熱的中立状態（評点が0）に近づき、翻って冷却部位の温熱感覚においては温覚側（評点が正）から冷覚側（評点が負）に転じた。温熱感覚は深部温度と皮膚表面温度の両者が相互に関連して発現することが知られているが [20]、本研究においても局所冷却による平均皮膚表面温度と深部温度を反映する鼓膜温度の変化が全身の温熱感覚を遷移させた要因として考えられる。以上のことから、暑熱環境において全身に対する一様な冷却を行なわなくとも、一部の部位に対する局所的な冷却により温熱感覚を変化させることが可能であり、冷却温度の低下により全身の温熱感覚を熱的中立状態へ遷移させる効果が期待できると考えられる。ただし、局所冷却の特性上、Fig. 4(b) で見られたように冷却部位の温熱快適感が低下しやすいことから、冷却温度を設定する際には冷却部位の温熱感覚を十分に考慮する必要性が示唆される。

一方、局所冷却における主観的温度感受性の影響については、Fig. 5(a) で見られたように非暑がり傾向の被験者群の温熱感覚が冷却温度の低下と共に無冷却時に比べ暑熱感が低下する（涼しく感じる）傾向が見られたのに対し、暑がり傾向の被験者群では殆ど変化が見られなかった。また、Fig. 9 で見られたように局所冷却に対する暑がり傾向の被験者群の鼓膜温度の上昇が非暑がり傾向の被験者群に比べ大きい傾向が見られたが、鼓膜温度自体は局所冷却の有無にかかわらず、非暑がり傾向の被験者群の方が有意に高い傾向であった。これらについては温熱感覚と深部温度の関係から、次のように解釈できるものと思われる。Mower [20] は深部温度が低、中、高温の3条件において皮膚温度刺激を変化させた際の温熱的快適感（温熱感覚）を調査し、たとえ同じ皮膚温度刺激であっても深部温度の違いにより、温熱的快適感は快適にも不快にも変化し、人体内部の温熱的状态すなわち深部温度に依存して温熱感覚が決定されることを明らかにしている。これに照らして考えてみると、無冷却時の深部温度が高温であるほど、局所冷却によって高い快適感（暑熱感の低減）が得られ、反対に深部温度が中程度であれば、同じ冷却温度であっても局所冷却の効果を感じにくいことが推測される。本実験においても深部温度を反映する鼓膜温度が無冷却時に相対的に高い傾向を示していた非暑がり傾向の被験者群で、Fig. 5(a) のように局所冷却の効果を知覚しやすい傾向が見られた。一方、無冷却時の鼓膜温度が相対的に低い暑がり傾向の被験者群では局所冷却による温熱感覚の変化は鈍く、冷却温度の違いによる温熱感覚の変化が殆ど見られなかった。このことから、主観的温度感受性の差異による局所冷却の効果の違いは、深部温度が主観的温度感受性によって異なることに起因するものである可能性が示唆される。すなわち、暑熱環境においては深部温度が高温であるほど体温調節の上で好ましくない状態であることから、人体内部の温熱状態を是正する局所冷却の効果は知覚されやすく、温熱感覚の遷移が生じやすいと考えられる。なお、主観的温度感受性の違いによ

り冷却の有無にかかわらず平均皮膚表面温度と鼓膜温度が異なっていたことについては、温度感受性によって体温調節におけるセットポイント [21] が異なる可能性等が考えられる。これについては皮膚の温度受容器等に基づく生理的な温度感受性の分類による実験結果も加え、稿を改めて報告したい。以上のことから、局所冷却時の心身反応における主観的温度感受性の影響については、主観的温度感受性による深部温度の違いが局所冷却における温熱感覚の違いを生じさせる要因であることが示唆された。また、主観的温度感受性の違いにより心身反応に異なる傾向が確認されたことから、温度感受性を考慮した効果的な局所冷却の可能性があると推察される。

5. 結 言

省エネルギー性と快適性を両立する環境の実現に向けた被服分野における取り組みの1つである局所冷却に関して基礎的知見を得るために、暑がり傾向と非暑がり傾向に分類した被験者群に対して様々な冷却温度で局所冷却を行なった際の暑熱環境における温熱感覚ならびに平均皮膚表面温度、鼓膜温度を計測し、局所冷却時の心身反応に対する冷却温度と主観的温度感受性の影響について調査した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 暑熱環境において局所冷却温度が低下すると、全身の暑熱感が緩和され、無冷却時に比べ平均皮膚表面温度の低下、および鼓膜温度の上昇が認められた。冷却部位における温熱感覚は、冷却温度の低下に伴い温覚から冷覚に遷移する傾向が見られた。
- (2) 暑がり傾向の被験者群と非暑がり傾向の被験者群では環境温に対する全身の温熱感覚が異なり、平均皮膚表面温度、鼓膜温度についても両者で異なる傾向が見られた。
- (3) 非暑がり傾向の被験者群は冷却温度の低下に伴い全身の暑熱感が緩和される傾向が見られたのに対し、暑がり傾向の被験者群は全身の温熱感覚が殆ど変化しなかった。鼓膜温度については逆に、非暑がり傾向の被験者群に比べ、暑がり傾向の被験者群では局所冷却による鼓膜温度の上昇幅が有意に大きい傾向が見られたが、鼓膜温度自体は冷却の有無にかかわらず非暑がり傾向の被験者群の方が高い傾向であった。冷却部位における温熱感覚、皮膚表面温度、および平均皮膚表面温度は主観的温度感受性による違いは殆どなく、主に冷却温度による影響のみが確認された。

以上のことから、局所冷却時の心身反応は冷却温度と主観的温度感受性の影響を少なからず受けており、これらの要因を考慮することで、省エネルギー性と快適性を効果的に改善できる可能性が示唆された。なお、今回は快適性のみに着目し、効率性については考慮していなかったことから、今後は効率性に対する局所冷却の効果を検証すると共に、冷却面積等の冷却条件、さらに年齢・性別等の被験者の属性を拡大し、効果的な局所冷却の条件について検討を重ねていく予定

である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム「国際ファイバー工学教育研究拠点」平成 21 年度 院生・若手研究プロジェクトによる支援を受けた。

References

- [1] Ministry of the Environment, Japan (2010) “Annual Report on the Environment, the Sound Material-Cycle Society and the Biodiversity in Japan 2010”, pp31–60, Ministry of the Environment Japan
- [2] Ministry of the Environment, Japan (2010) “CDM/JI Manual for Project Developers and Policy Makers–2010”, pp2–38, Ministry of the Environment Japan
- [3] The Asahi Shimbun Company (2007) The Asahi Shimbun (November 20, 2007), p33, The Asahi Shimbun Company
- [4] Haneda M, Nishihara N, Nakamura S, Uchida S, Tanabe S (2009) J Environ Eng AIJ, **74**, 389–396
- [5] Haneda M, Nishihara N, Tanabe S (2006) Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ 2006, D-2, 455–458
- [6] Miyake M, Suzuki K, Takeda N, Horikoshi T (2008) Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ 2008, D-2, 377–378
- [7] Tsutsumi H, Yasuda Y, Takeda N, Arishiro A (2006) Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ 2006, D-2, 439–440
- [8] Listiani N H, Yanagi S, Okura T, Honma H (2004) Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ 2004, D-2, 555–556
- [9] Lee U, Tamura T (1995) J Home Econ Jpn, **46**, 1081–1090
- [10] Nishihara N (2002) J Human Environ Eng, **4**, 214–221
- [11] Nakamura M, Yoda T, Crawshaw L. I., Yasuhara S, Saito Y, Kasuga M, Nagashima K, Kanosue K (2009) J Jpn Biometeorology, **46**, 69
- [12] Yamasaki K, Yoda T, Nojiri K, Yasuhara S, Yokoi M, Ishibashi K, Higuchi S, Maeda T (2006) Jpn J Physiological Anthropology, **11**, 13–20
- [13] Tamura T (2000) J Home Econ Jpn, **51**, 1089–1092
- [14] Yamasaki K, Nojiri K, Sato Y, Ishibashi K, Higuchi S, Maeda T (2006) Jpn J Physiological Anthropology, **11**, 21–28
- [15] Satsumoto Y (2006) “Kaiteki Life wo Kagaku suru”, pp10–11, Maruzen, Tokyo
- [16] Hardy J.D., DuBois E.F. (1938) J Nutr, **15**, 461–475
- [17] Tamura T (1993) Jpn Home Economics, **44**, 703–712
- [18] Monobe H, Murayama M, Ikuno H, Nakahashi M (2002) Jpn J Physiological Anthropology, **11**, 123–127
- [19] Hujisawa K, Kakigi S, Yamazaki K (1998) “Physiological Psychology”, pp222–236, Kitaohji Shobo
- [20] Mower C. D. (1976) J Comp Physiol Psychol, **90**, 1152–1155
- [21] Nakayama T (1977) Jpn J Medical Electronics and Biological Engineering, **15**, 157–163