

Heat Loss Through the Glabrous Skin Surfaces of Heavily Insulated, Heat-Stressed Individuals

Grahn DA¹, Dillon JL², Heller HC¹

Insulation reduces heat exchange between a body and the environment. Glabrous (nonhairy) skin surfaces (palms of the hands, soles of the feet, face, and ears) constitute a small percentage of total body surface area but contain specialized vascular structures that facilitate heat loss. We have previously reported that cooling the glabrous skin surfaces is effective in alleviating heat stress and that the application of local subatmospheric pressure enhances the effect. In this paper, we compare the effects of cooling multiple glabrous skin surfaces with and without vacuum on thermal recovery in heavily insulated heat-stressed individuals. Esophageal temperatures T_{es} and heart rates were monitored throughout the trials. Water loss was determined from pre- and post-trial nude weights. Treadmill exercise (5.6 km/h, 9–16% slope, and 25–45 min duration) in a hot environment (41.5°C, 20–30% relative humidity) while wearing insulating pants and jackets was used to induce heat stress $T_{es} > 39^\circ\text{C}$. For postexercise recovery, the subjects donned additional insulation (a balaclava, winter gloves, and impermeable boot covers) and rested in the hot environment for 60 min. Postexercise cooling treatments included control (no cooling) or the application of a 10°C closed water circulating system to (a) the hand(s) with or without application of a local subatmospheric pressure, (b) the face, (c) the feet, or (d) multiple glabrous skin regions. Following exercise induction of heat stress in heavily insulated subjects, the rate of recovery of T_{es} was $0.4 \pm 0.2^\circ\text{C}/\text{h}$ (n=12), but with application of cooling to one hand, the rate was $0.8 \pm 0.3^\circ\text{C}/\text{h}$ (n=12), and with one hand cooling with subatmospheric pressure, the rate was $1.0 \pm 0.2^\circ\text{C}/\text{h}$ (n=12). Cooling alone yielded two responses, one resembling that of cooling with subatmospheric pressure (n=8) and one resembling that of no cooling (n=4). The effect of treating multiple surfaces was additive (no cooling, T_{es} $0.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$; one hand, $0.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$; face, $1.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$; two hands, $1.3 \pm 0.1^\circ\text{C}$; two feet, $1.3 \pm 0.3^\circ\text{C}$; and face, feet, and hands, $1.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$). Cooling treatments had a similar effect on water loss and final resting heart rate. In heat-stressed resting subjects, cooling the glabrous skin regions was effective in lowering T_{es} . Under this protocol, the application of local subatmospheric pressure did not significantly increase heat transfer per se but, presumably, increased the likelihood of an effect.

DOI: 10.1115/1.3156812

Keywords: insulation, heat stress, heat loss, glabrous skin, subcutaneous vasculature

【抄録和訳】

高温ストレス状態で断熱素材着用時の無毛皮膚表面からの体温冷却

1 スタンフォード大学生物学部、2 米陸軍大学土木工学部

断熱によって体と環境の間の熱交換を減少させることができる。無毛皮膚表面（手掌、足の裏、顔面や耳など）は全体表面のうちの少ししか占めないものの、放熱に特化した血管構造をもっている。

無毛皮膚表面を冷却することで高温ストレスを軽減させるのに有効であり、体の局所を低圧（陰圧）にすることでさらにその効果を強化できることは以前の研究で報告済である。本論文では、真空ありとなしの場合で、断熱素材を着用した高温ストレス下の被験者における体温回復に対して複数の無毛皮膚表面を冷却することの効果と比較する。

実験期間中、食道温 (T_{es}) と心拍数をモニターした。水分喪失は実験前後の衣類なしの体重で特定した。

断熱素材の長袖長ズボンを着用した状態での高温環境 (41.5 °C, 相対湿度 20-30%) でトレッドミル運動 (5.6 km/時, 傾斜 9-16%, 運動時間 25~45 分間) を行うことで高温ストレス状態 ($T_{es} > 39^\circ\text{C}$) とした。運動後の回復時間には被験者は追加の断熱服を着用し (バラクラバ帽、冬用手袋、非透水性ブーツカバー)、60 分間高温環境で休憩した。

運動後の冷却処理は、コントロール群 (冷却なし) もしくは 10°C の閉鎖型水循環システムに (a) 手、(b) 顔面、(c) 両足、(d) 複数の無毛皮膚部位、を入れ、局所への低圧 (陰圧) 処理あり群となし群に分けた。

相当の断熱衣類を着用した被験者の高温ストレスでの運動ののち、食道温の回復率は $0.4 \pm 0.2^\circ\text{C} \cdot \text{時}$ (n=12) であったが、片手を冷却した場合の回復率は $0.8 \pm 0.3^\circ\text{C} \cdot \text{時}$ (n=12)、片手の冷却と低圧 (陰圧) 処理の場合の回復率は $1.0 \pm 0.2^\circ\text{C} \cdot \text{時}$ (n=12) であった。

冷却のみでは二つの反応が得られ、一つは低圧と冷却(n=8)、もう一つは冷却なしの場合(n=4)である。複数の皮膚表面への処理は追加的効果が得られた(冷却なし 食道温= $-0.4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$; 片手, $-0.9 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$; 顔面, $-1.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$; 両手, $-1.3 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$; 両足; $-1.3 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$; 顔面両足と両手, $-1.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$)。冷却処理は水分喪失と最終的な安静時心拍数に類似の影響がみられた。高温ストレス下の安静時の被験者では、無毛部位を冷却するのは食道温の低下には有効であった。このプロトコルに沿って、局所の低圧処理は熱交換を有意に上げることはなかったが、おそらくは効果の尤度比はあげられたであろう。

Journal of Biomechanical Engineering JULY 2009, Vol. 131 / **071005-7**