

人の熱放散反応を改善する可能性がある温度以外の入力

神戸大学 近藤 徳彦
(共同研究者) 水口東高等学校 富永 寛隆
奈良女子大学 芝崎 学
神戸大学 青木 健

The Possible Role of Nonthermal Factors in Improving the Heat Loss Response in Humans

by

Narihiko Kondo, Ken Aoki

Laboratory for Applied Human Physiology,

Faculty of Human Development, Kobe University

Hiroataka Tominaga

Minakuchi Higashi High School, Shiga Prefecture

Manabu Shibasaki

Faculty of Human Life and Environment,

Nara Women's University

ABSTRACT

Nonthermal factors for control of heat loss during exercise are suggested to be one of the mechanisms that improve the heat loss response in humans with physical training. The purpose of this study was to investigate the relationship between the magnitude of the nonthermal factors and the heat loss response. Eight healthy male subjects participated in this study. They performed an isometric handgrip (IH) exercise for 60 sec at four different intensities (15, 30, 45, and 60% of maximal voluntary contraction – MVC) at an ambient temperature of 35°C

and a relative humidity of 50%. Esophageal temperature and mean skin temperature did not change with the rise in exercise intensity and were similar at all exercise intensities, while the heart rate (HR), rating of perceived effort (RPE), and mean arterial pressure (MAP) all increased with intensity. The sweating rate (SR) on the chest, and the right and left forearm and palm increased with the rise in intensity, although the pattern of the change in SR on the palm differed from that on the other body sites. The SR on the chest and forearm were significantly above the pre-exercise level when the exercise intensity was 30% MVC or more, while the change in SR on the palm was significantly increased at 45% MVC or more. The skin blood flow (SkBF) and cutaneous vascular conductance (CVC) on the chest and left forearm increased with exercise intensity, although the differences in CVC with exercise intensity were not marked. Furthermore, the SkBF and CVC at both these sites did not change significantly from the level at 15% MVC. The results indicate that nonthermal factors cause the changes in the heat loss response with a rise in IH exercise. These responses were induced at intensities of 30% MVC or more, although the heat loss response was greater with a rise in the magnitude of the nonthermal factors.

要 旨

運動に伴う身体トレーニングが熱放散反応を改善する仕組みとして、体温などの要因以外に非温熱性要因の入力も関係している可能性がある。本研究ではその入力の大きさと熱放散反応の変化との関係を検討した。被験者は健康な男子学生8名であり、環境温35℃、相対湿度50%の環境制御室内で最大等尺性筋収縮力(MVC)の15、30、45および60%の強度のアイソメトリックハンドグリップ(IH)運動を60秒間実施した。IH運動強度の増加とともに、心拍数、自覚的運動強度および平均血圧は増加したが、食道温および平均皮膚温はいずれの運動中も一定の値を示した。胸部、左右前腕部および手掌部の発汗量(SR)は強度の変化とともに増加したが、その増加の仕方は手掌部SRと他の部位のSRでは異なっていた。胸部と前腕部SRでは30%MVC以上の運動強度で手掌部SRでは45%MVC以上の運動強度で、それぞれ顕著な増加を示した。

胸部および左前腕部の皮膚血流量(SkBF)と皮膚血管コンダクタンス(CVC)は運動強度の変化とともに増加したが、CVCの増加は運動強度間で顕著な差は認められなかった。また、いずれもSRと同様に15%MVCでは顕著な増加を示さなかった。以上のことより、IH運動中に起こる熱放散反応は主に非温熱性要因が関与していると考えられる。非温熱性要因の大きさとともに熱放散反応も増大するが、顕著な熱放散反応を引き起こすためには30%MVC以上の強度の運動が必要であると考えられる。

はじめに

身体内部の生理学的パラメータの恒常性を維持することは、日常の生活をより健康的に過ごし、また、運動などのパフォーマンスを向上させるためにも重要であると考えられる。人の深部体温はそのパラメータとして大切なものであり、したがってこれをコントロールしている体温調節機構は人にとって欠くことのできないものである。体温

調節機構の一つである熱放散反応（発汗反応と皮膚血流反応）は一定期間高温環境下に暴露されると改善され^{3, 11, 14}，身体トレーニングを行うとその改善程度はさらに大きくなる¹¹。改善としてはある温熱負荷に対して発汗が早く開始したり，皮膚血流量が多くなる。しかし，身体トレーニングが熱放散反応を改善する原因に関しては不明な点が残されている。

運動時における熱放散反応は深部体温と皮膚温など温度に依存する要因（温熱性要因）^{5, 10, 12}と，それ以外の要因（非温熱性要因：セントラルコマンド，筋内の機械的あるいは代謝的受容器からの求心性入力，血压反射等）の二つが関与している^{6, 7, 9, 17, 18, 20}。身体トレーニングが熱放散反応をより改善する理由を明らかにするためには，熱放散反応に対してこれらの要因がどのように関与しているかを知る必要がある。これまで前者の温熱性要因が熱放散反応に及ぼす影響に関してはその評価法も含めて詳細に検討されているが，運動による身体トレーニングの場合に重要と考えられる非温熱性要因の影響に関しては不明な点が多い。

そこで，本研究では非温熱性要因の入力の大きさが熱放散反応にどのように影響しているのかを検討した。この入力のみで熱放散反応が引き起こされる特性を明らかにできれば，運動による身体トレーニングが熱放散反応をより改善する原因の一つを理解することできると考えられる。

1. 研究方法

1. 1 被験者

被験者は健康な男子学生8名で，被験者の身体特性は身長 170.6 ± 5.4 (SD) cm，体重 69.0 ± 8.5 kgおよび年齢 23.9 ± 2.5 yrであった。被験者3名は大学のスポーツクラブに所属し，トレーニングを実施していた。残りの5名は週に1~2回スポーツを実施している者であった。被験者

に対して事前に実験の主旨，実験条件および測定内容について説明し，実験参加の同意を得た。

1. 2 実験手順および条件

実験は環境温 35°C ，相対湿度50%に設定された環境制御室（SR3000，精度：室温 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，相対湿度 $\pm 3\%$ ，室内気流 $0.1 \sim 0.3$ m/sec，室内容積 38.03 m³，ナガノ科学社製）で実施した。この環境下では安静にしていると発汗がみられる状況である。被験者はショートパンツのみを着用し，この部屋で約60分間仰臥位安静を保持した。その間に，生体パラメータ測定用のセンサーを装着した。その後，最大等尺性筋収縮力（MVC）の測定を2回実施し，高い方の値から相対運動強度（%MVC）を算出した。約20分間の休息後，右腕においてアイソメトリックハンドグリップ（IH）運動を15，30，45および60%MVCの強度で，それぞれ60秒間実施した。強度間には少なくとも10分以上の休息を挟み，運動強度の順番はランダムとした。IHの筋出力はオシロスコープ上に表示し，被験者にはその表示が目標値と同じになるように指示した。また，IH運動中は呼吸を15回/分に制限した。このIH運動中は代謝量が少ないため，運動時間が60秒程度であれば深部体温の上昇を伴わず，上述した非温熱性要因のみを変化させることが可能となる。なお，実験中，水分摂取は実施しなかった。

1. 3 測定項目

心拍数（HR），自覚的運動強度（RPE），平均血圧（MAP），深部体温（食道温；Tes），皮膚温および局所発汗量（SR）を胸部，前腕部および手掌部で，皮膚血流量（SkBF）を胸部と前腕部で，実験中連続的に測定した。

HRはCM5による胸部誘導により，心拍テレメトリー（DS-3130，Fukuda電子社製）により計測した。運動時のRPEを各運動強度終了時に口頭で指示させた。RPEについてはBorgのチャート¹⁾

を利用し、セントラルコマンドの指標に用いた¹⁹⁾。MAPの測定には自動血圧計 (Finapres, Ohmeda社製) を用い、左の中指より収縮期血圧と拡張期血圧とを測定し、拡張期血圧 + (収縮期血圧 - 拡張期血圧) / 3 の式よりMAPを算出した。Tesと皮膚温の測定には熱電対 (銅-コンスタンタン) を用いた。Tesは鼻腔より約40cm (身長¹/4) センサーを挿入することにより測定した。皮膚温は身体の9部位 (左胸部, 右前腕部, 左前腕部, 左手掌部, 前額部, 腹部, 大腿部, 下腿部および足甲部) より測定し、これらから平均皮膚温 (\bar{T}_{sk}) を算出した⁴⁾。また、発汗カプセル内の皮膚温 (T_{sc}) を左前腕部において測定した。

SRは換気カプセル法により、左胸部, 左右前腕部および左手掌部より測定し、手掌部が1.53 cm², それ以外の部位が7.06 cm²の円形の換気カプセルを装着し、それに1.5 l/minの乾燥窒素を流し、カプセルを通過した窒素の湿度変化を静電容量湿度計 (HMP133Y, Vaisala社製) で計測した。また、SkBFの測定にはレーザードップラー法による血流測定器 (ALF21, アドバンス社製) を用い、左胸部と左前腕部で測定した。これらの測定部位は発汗測定用カプセルから1.5cm以内とした。SkBFをMAPで除することにより、皮膚血管コンダクタンス (CVC) を算出した。体温パラメータ, SRおよびSkBFの出力は1秒毎にデータロガー (HR2400, 横河電機社製) を介して、パーソナルコンピュータ (PC9801RA, NEC社製) に取り込み、局所発汗量等を算出した。

1. 4 統計処理

各実験条件における変化量はIH運動中の最大値からIH運動開始直前の10秒間の値 (ベースライン) を差し引くことにより求めた。ベースラインからの変化量の検定にはPaired-t testを、強度間の差の検定には一元配置の分散分析を用いた。なお、有意水準は5%以下とした。

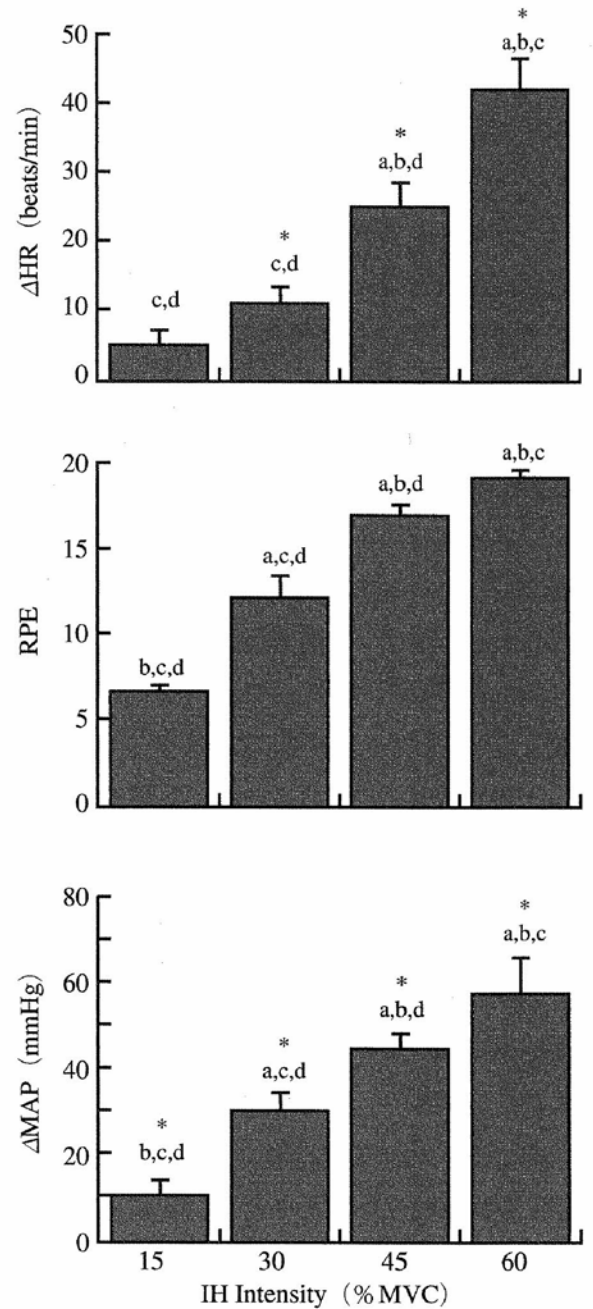


図1 Changes in heart rate (Δ HR), rating of perceived effort (RPE) and mean arterial pressure (Δ MAP) with a rise in exercise intensity (15, 30, 45, and 60% maximal voluntary contraction - MVC). Values are the means \pm SE for 8 subjects. ^a Significant difference from 15% MVC ($p < 0.05$). ^b Significant difference from 30% MVC ($p < 0.05$). ^c Significant difference from 45% MVC ($p < 0.05$). ^d Significant difference from 60% MVC ($p < 0.05$). * Significant difference from the pre-exercise level ($p < 0.05$).

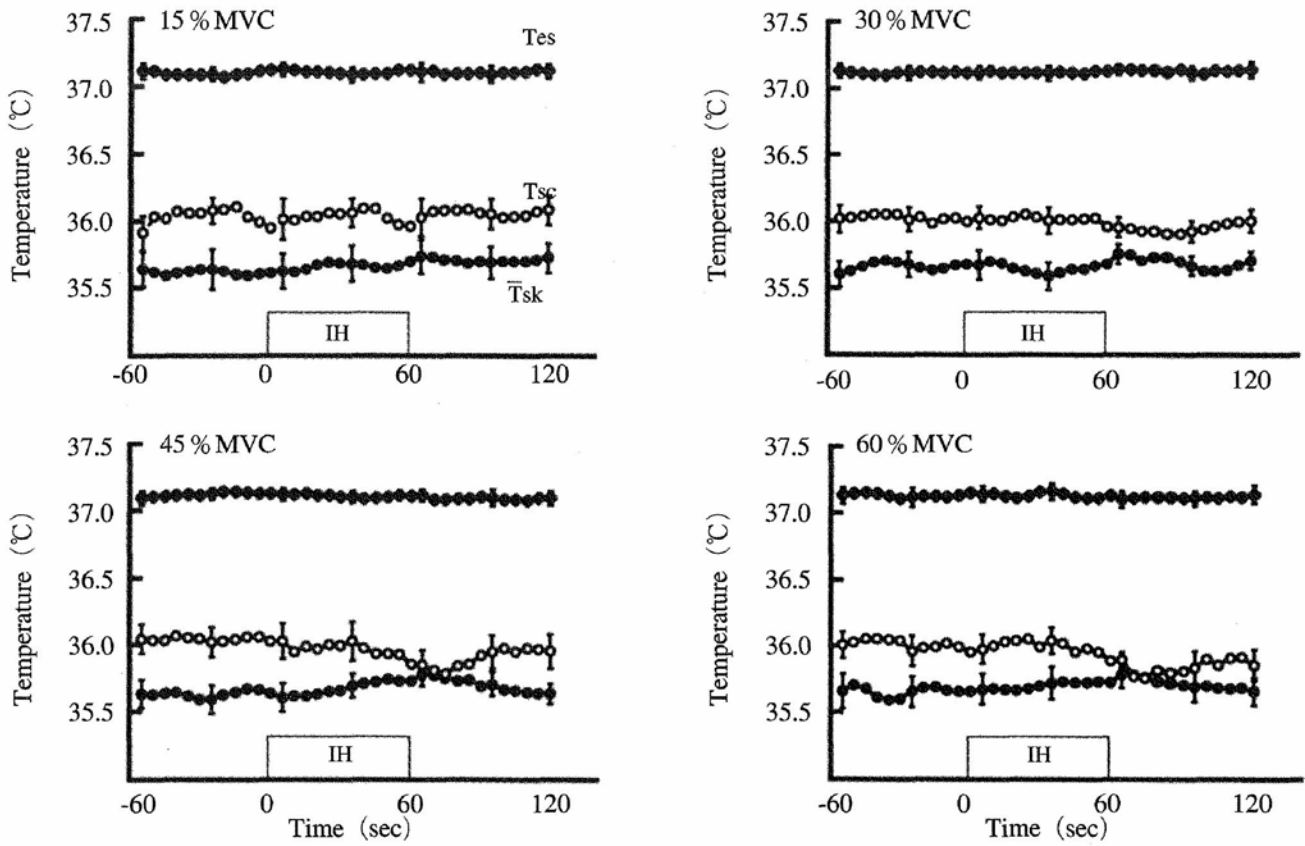


図 2 Responses in esophageal temperature (T_{es}), mean skin temperature (\bar{T}_{sk}) and local skin temperature on the left forearm inside capsule (T_{sc}) during isometric handgrip (IH) exercise at each intensity (15, 30, 45, and 60% MVC). Values are the means \pm SE for 8 subjects.

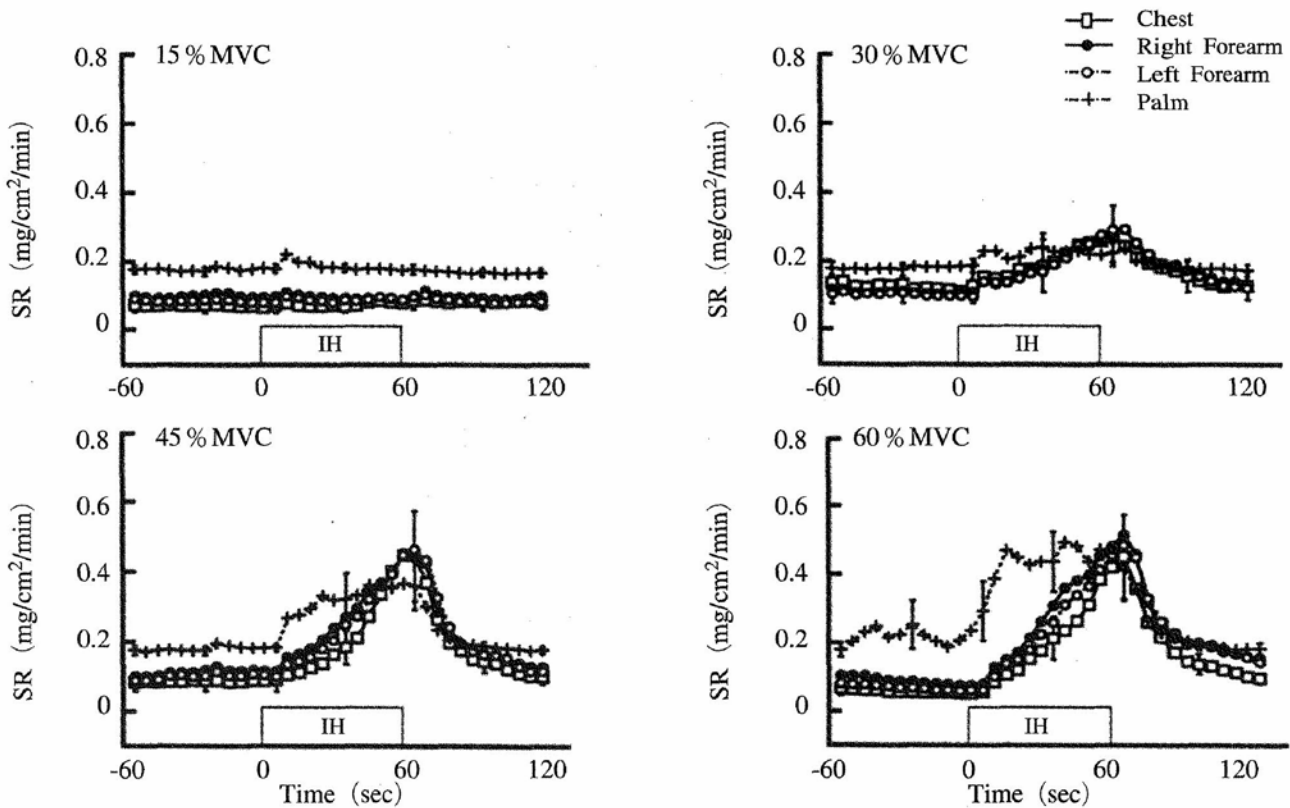


図 3 Responses in sweating rate (SR) on the chest, right and left forearm and palm during isometric handgrip (IH) exercise at each intensity (15, 30, 45, and 60% MVC). Values are the means \pm SE for 8 subjects.

2. 結果

図1にHR, RPEおよびMAPの運動中の変化量を強度別に示した。いずれのパラメータとも運動強度とともに増加した。15%MVCの強度の運動では安静時と比較して, HRとRPEの増加は有意ではなかった。一方, 各運動時の体温パラメータ (T_{es} , \bar{T}_{sk} および T_{sc}) は運動中ほぼ一定の値を示した (図2)。

図3には各部位のSRの経時変化を運動強度別に示した。15%MVCの強度では運動中SRは顕著に変化しなかった。一方, 30%MVC以上の運動では運動強度の増加に伴って, 各部位のSRの増加も大きくなった。SkBFも同様に30%MVC以上の運動でその変化が顕著になった (図4)。また, 手掌部 (無毛部) SRと他の部位 (有毛部) SRとは運動に伴う変化の仕方が異なっていた。手掌部SRは運動開始後, 急激に増

加した後, プラトーに達し, それ以外の部位のSRは運動継続とともにほぼ直線的に増加する傾向にあった。

図5に各部位のSRの変化量を運動強度別に示した。左右前腕部SRは30%MVC以上で運動開始前の値と比較して有意な増加を示し, 胸部では15%MVCにおいてすでに有意な増加がみられた。一方, 手掌部SRは45%MVC以上で有意な増加を示した。胸部と左右前腕部のSRは運動強度増大とともに有意に増加するが, 45%と60%MVCの間の変化には有意な差が認められなかった。手掌部SRでは30%MVC以上の運動において強度の変化とともにSRも有意に増加した。

図6に胸部と左前腕部のSkBFとCVCの変化量を運動強度別に示した。SkBFにおいて両部位とも15%MVCでは顕著な増加を示さなかった。いずれの部位も強度の増加とともにSkBFも増加

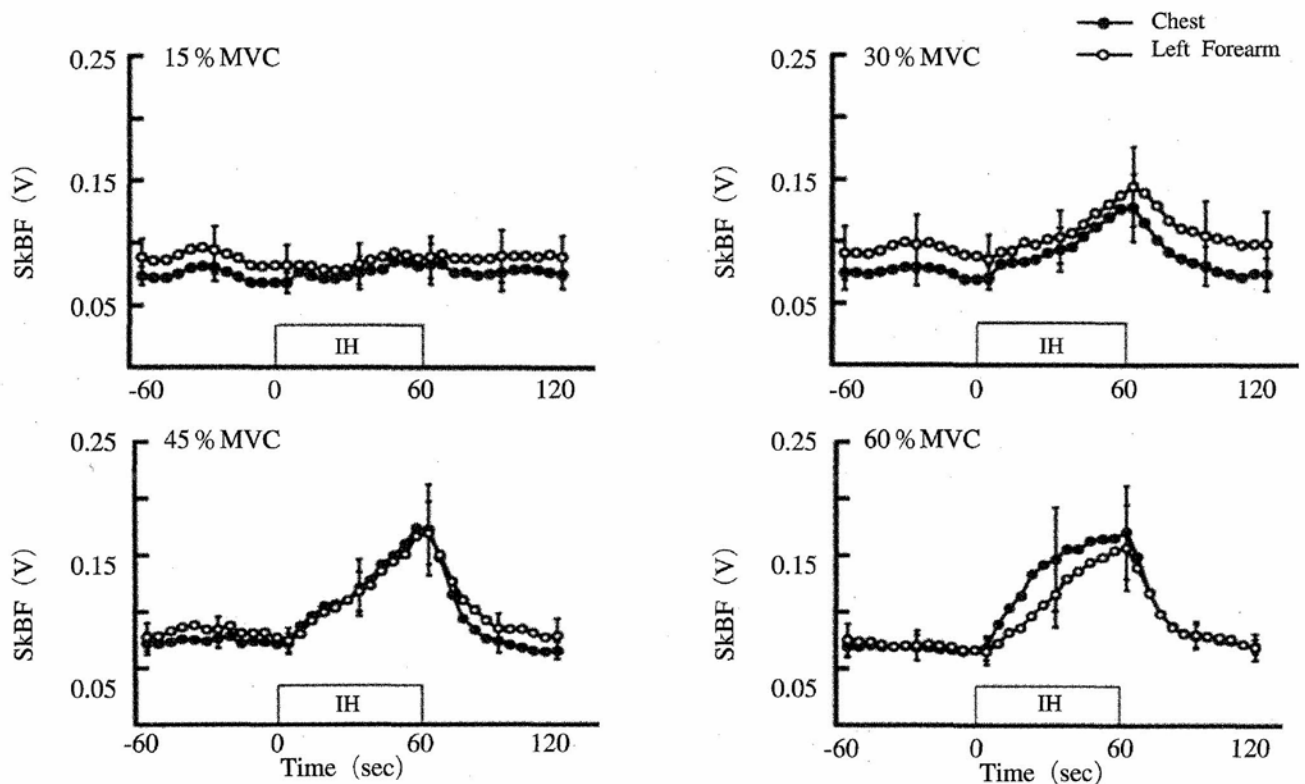


図4 Responses in skin blood flow (SkBF) on the chest and left forearm during isometric handgrip (IH) exercise at each intensity (15, 30, 45, and 60% MVC). Values are the means \pm SE for 8 subjects.

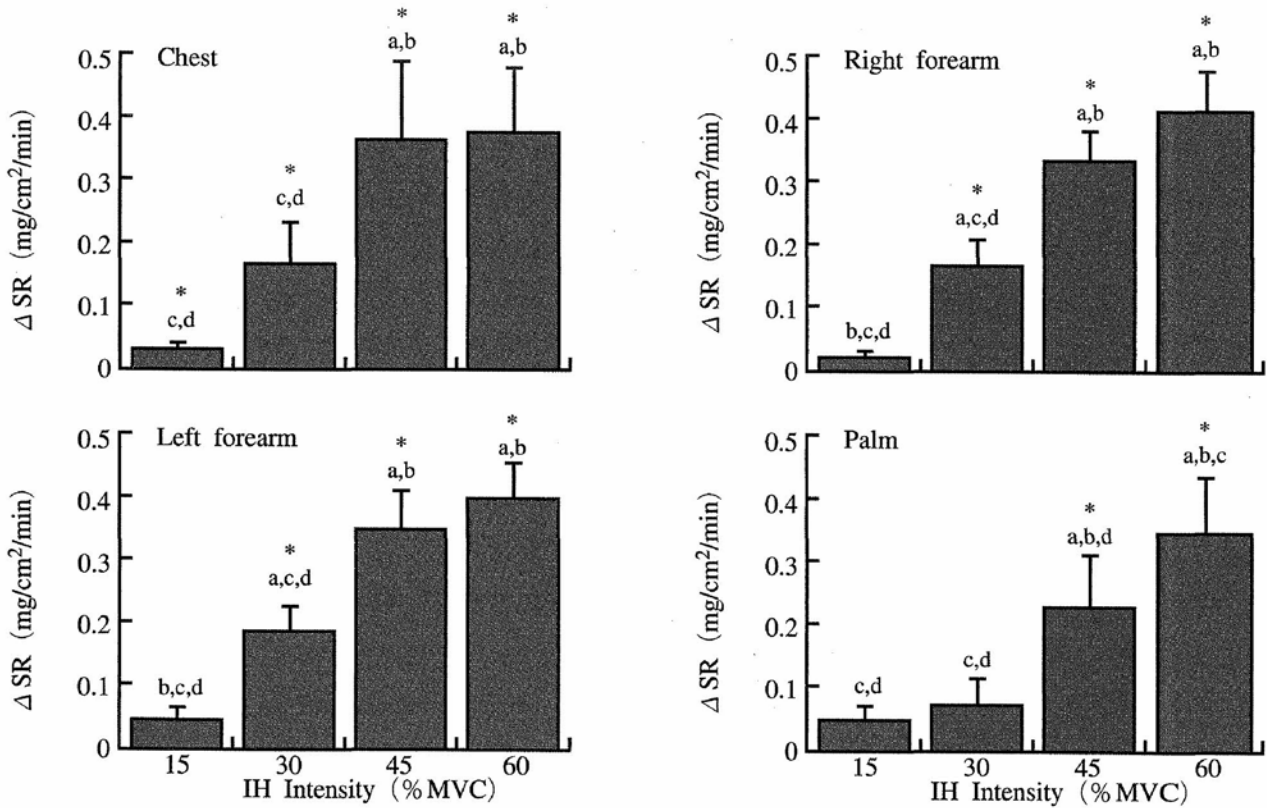


図 5 Changes in sweating rate (SR) on the chest, right and left forearm and palm with a rise in exercise intensity (15, 30, 45, and 60% MVC). Values are the means \pm SE for 8 subjects. ^a Significant difference from 15% MVC ($p < 0.05$). ^b Significant difference from 30% MVC ($p < 0.05$). ^c Significant difference from 45% MVC ($p < 0.05$). ^d Significant difference from 60% MVC ($p < 0.05$). * Significant difference from the pre-exercise level ($p < 0.05$).

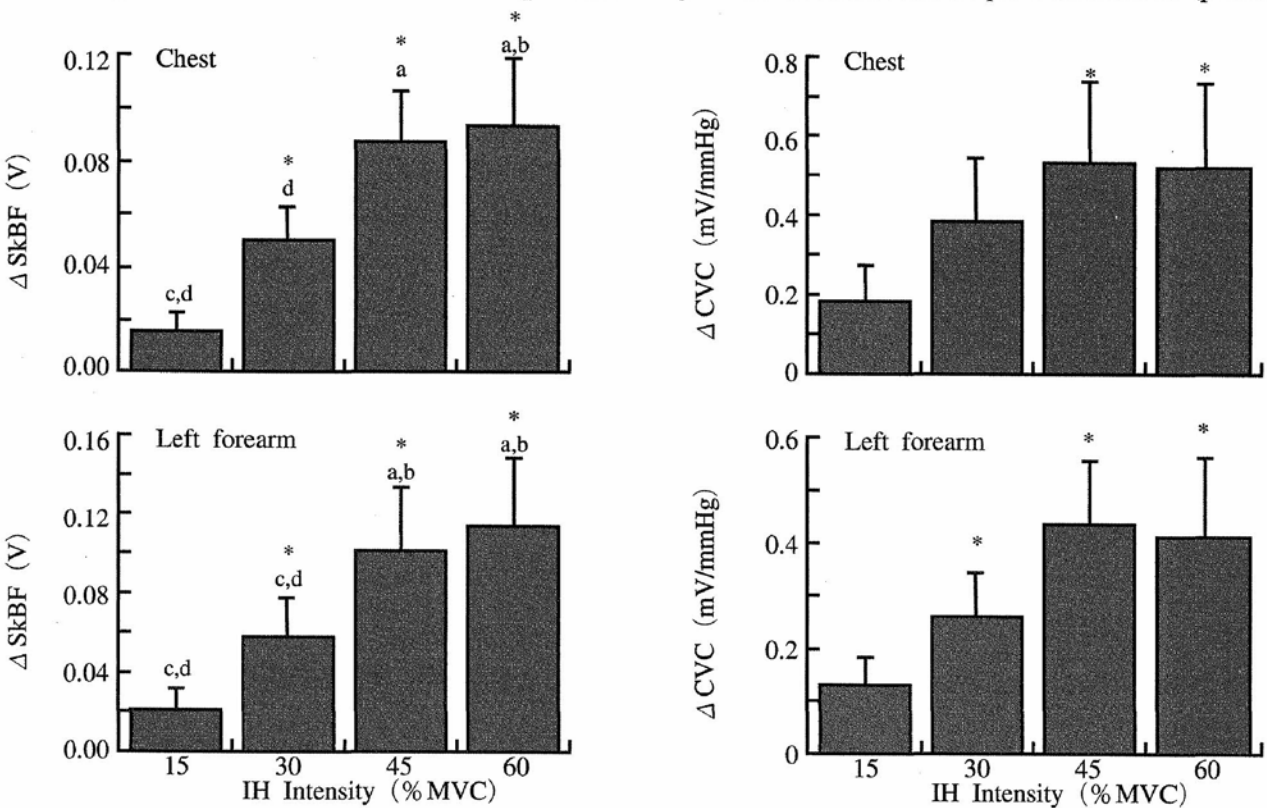


図 6 Changes in skin blood flow (SkBF) on the chest and left forearm with a rise in exercise intensity (15, 30, 45, and 60% MVC). Values are the means \pm SE for 8 subjects. ^a Significant difference from 15% MVC ($p < 0.05$). ^b Significant difference from 30% MVC ($p < 0.05$). ^c Significant difference from 45% MVC ($p < 0.05$). ^d Significant difference from 60% MVC ($p < 0.05$). * Significant difference from the pre-exercise level ($p < 0.05$).

する傾向にあったが、運動強度間で有意差が認められる強度が部位によって異なっていた。胸部の Δ CVCでは45%および60%MVCにおいて運動前の値より有意に増加した。また、前腕部では15%MVCを除く強度において有意に増加した。しかし、両部位とも各運動強度間には有意な差は認められなかった。

3. 考 察

前述したように人の発汗反応と皮膚血流反応には温熱性要因と非温熱性要因の両者が関与している。運動などの身体トレーニングによって熱放散反応は改善されるが、この改善には両要因が関与していることが考えられる。本研究では後者の要因、すなわち非温熱性要因に対する熱放散反応の特性を明らかにすることにより、身体トレーニングが熱放散反応を改善する機構を検討することにした。

非温熱性要因による熱放散反応を引き起こすために、本研究では高温環境下でIH運動を実施する方法を用いた。IH運動は動的運動と比較すると、代謝量の大きな変化が起こらないので、短時間の運動であれば深部体温や皮膚温の変化を伴わない。このことはIH運動時にみられる熱放散反応は主に非温熱性要因によるもので、この反応を検討することで、非温熱性要因による熱放散反応の特性を明らかにできると考えられる。本研究において、様々な強度のIH運動を実施したが、 T_{es} や T_{sk} などは運動中ほとんど変化しなかった(図2)。しかし、SRやSkBFは運動強度に依存する変化を示した(図3-6)。このことは本研究における熱放散反応は非温熱性要因が主に関与したと考えられる。

本研究において胸部と左右前腕部のSR、およびSkBF(CVC)とも15%MVCの強度の運動では大きな変化を示さない(図5-6)。これはHRやRPEの変化と類似している(図1)。一方、

それ以上の強度になると運動前の値より顕著に変化し、その程度は運動強度が強いほど大きい傾向にある。このことは非温熱性要因による熱放散反応を引き起こすためにはある強度が必要で、それはHRなどの値が顕著に変化する程度の負荷であることが推察される。循環パラメータとしてのMAPは15%MVCですでに運動前より有意に高い値を示している(図1)。熱放散反応は血圧反射の影響も受けることが報告されているが⁹⁾、15%MVCで熱放散反応は十分に引き起こされなかった。

今回、SRは胸部と左右前腕部とも運動強度の変化に伴う増加の傾向はほぼ同様であった(図5)。このことは非温熱性入力による熱放散反応は全身均一に起こることを示していると考えられる。発汗反応は手掌部などの部位(精神性発汗を起こす部位)とそれ以外の部位(温熱性発汗を起こす部位)ではその反応の違いが報告されている^{8, 13)}。本研究においてもIH運動に伴う経時変化あるいは運動強度の変化に伴うSRの増加パターンに両部位で違いが認められた(図3と図5)。すなわち、手掌部SRは運動開始とともに一過性の増加を示し、その後はほぼ一定の値であった。一方、胸部や前腕部SRは運動開始後、発汗開始まである潜時を有し、その後は運動終了までほぼ直線的に増加した。また、いずれの部位のSRとも運動強度の増加に伴って変化するが、手掌部SRでのその変化は強度が30%MVC以上になると強度とともに直線的に、胸部と前腕部では60%MVCになるとその増加が緩やかになる傾向にあった。このように有毛部と無毛部ではIH運動に対するSRの変化の違いが考えられる。

SkBFとCVCも運動強度の変化とともに増加する傾向がある(図6)。SkBFは血流量が増加しなくても、血圧の上昇によってそれが変化することが考えられる。そこでCVCの変化をみると、

部位によってその違いがあり、45%MVC以上の強度になると両部位のCVCは運動開始前より有意に増加している。しかし、運動強度の間では顕著な差異は認められない(図6)。これまでの報告より^{2, 6, 16)}、CVCの変化はIH運動の継続時間ならびにそれを実施する環境条件によって異なることが考えられる。

これまでの研究から、運動に関係する非温熱性要因として、1) セントラルコマンド^{6, 17, 18, 19)}、2) 筋の機械^{7, 17, 18)}あるいは代謝受容器⁶⁾からの求心性入力、3) 血圧反射⁹⁾、4) 浸透圧反射¹⁵⁾ならびに5) 精神的あるいは情緒的な負荷¹³⁾などが考えられている。これらの中で、呼吸・循環系に対して主に促進的に作用すると考えられる1)や2)の入力の関与が運動時の熱放散反応の亢進にも関与している可能性が考えられる。

以上のことから、IH運動中の熱放散反応は運動強度に伴う変化を示すが、熱放散反応を引き起こすためには30%MVC以上の強度が必要であり、この強度においてはHRやRPEの有意な変化を伴っていた。運動を実施したときの熱放散反応はその特性として非温熱性要因の大きさにも依存して引き起こされることが示唆される。

4. まとめ

運動に伴う身体トレーニングが熱放散反応を改善する仕組みとして、深部体温などの要因以外に非温熱性要因の入力も関係している可能性がある。本研究ではその入力の大さと熱放散反応の変化の関係を検討した。被験者は健康な男子学生8名であり、環境温35℃、相対湿度50%の環境制御室内で15、30、45および60%MVCの強度のIH運動を60秒間実施した。得られた結果は以下の通りである。

1. IH運動強度の増加とともに、HR、RPEおよびMAPは増加したが、TesおよびTskはいずれの運動中も一定の値を示した。このことから、

IH運動中に起こる熱放散反応は主に非温熱性要因が関与していると考えられる。

2. 胸部、左右前腕部および手掌部のSRは強度の変化とともに増加したが、その増加の仕方は手掌部SRと他の部位のSRでは異なっていた。胸部と前腕部SRでは30%MVC以上の運動強度で、手掌部SRでは45%MVC以上の運動強度で、それぞれ顕著な増加を示した。

3. 胸部および左前腕部のSkBFとCVCは運動強度の変化とともに増加したが、CVCの増加は運動強度間で顕著な差は認められなかった。また、SRと同様に15%MVCでは顕著な増加を示さなかった。

以上のことより、非温熱性要因の大きさとともに熱放散反応も大きくなるが、顕著な熱放散反応を引き起こすためには30%MVC以上の強度が必要であり、この強度においてはHRやRPEの有意な変化を伴っていた。

謝 辞

本研究にあたり、快く被験者を引き受けて下さった関係諸氏に感謝の意を表します。また、本研究に対し助成していただいた(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に御礼申し上げます。

文 献

- 1) Borg, G.; Borg's perceived exertion and pain scales. *Human Kinetics* (1998)
- 2) Crandall, C.G., Musick, J., Hatch, J.P., Kellogg, D.L. Jr. and Johnson, J.M.; Cutaneous vascular and sudomotor responses to isometric exercise in humans. *J. Appl. Physiol.*, 79, 1946-1950 (1995)
- 3) Gisolfi, C. and Robinson, S.; Relationship between physical training, acclimatization, and heat tolerance. *J. Appl. Physiol.*, 26, 530-534

- (1969)
- 4) Hardy, J.D. and Dubois, E.F. ; The technique of measuring radiation and convection. *J. Nutr.*, 15, 461-475 (1938)
 - 5) Kondo, N., Takano, M., Aoki, K., Shibasaki, M., Tominaga, H. and Inoue, Y. ; Regional differences in the effect of exercise intensity on thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation. *Acta Physiol. Scand.*, 164, 71-78 (1998)
 - 6) Kondo, N., Tominaga, H., Shibasaki, M., Aoki, K., Koga S. and Nishiyasu, T. ; Modulation of the thermoregulatory sweating response during activation of the muscle metaboreflex in humans. *J. Physiol. (Lond.)* 512.2, 591-598 (1999)
 - 7) Kondo, N., Tominaga, H., Shiojiri, T., Aoki, K., Takano, S., Shibasaki, M. and Koga, S. ; Sweating responses to passive and active limb movements. *J. Thermal. Biology*, 22, 351-356 (1997)
 - 8) Kuno, Y. ; Human Perspiration, Illinois ; Charles C Thomas, Springfield, (1956)
 - 9) Mack, G.W., Nishiyasu, T. and Shi, X. ; Baroreceptor modulation of cutaneous vasodilator and sudomotor responses to thermal stress in humans. *J. Physiol. (Lond.)* 483, 537-547 (1995)
 - 10) Nadel, E. R., Bullard, R. W. and Stolwijk, J.A.J. ; Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J. Appl. Physiol.*, 31, 80-87 (1971)
 - 11) Nadel, E.R., Pandolf, K.B., Roberts, M.F. and Stolwijk, J.A.J. ; Mechanism of thermal acclimation to exercise and heat. *J. Appl. Physiol.*, 37, 515-520 (1974)
 - 12) Nielsen, B. ; Thermoregulation in rest and exercise. *Acta Physiol. Scand. Suppl.*, 323, (1969)
 - 13) Ogawa, T. ; Thermal influence on palm sweating and mental influence on generalized sweating in man. *Jpn. J. Physiol.*, 25, 525-536 (1975)
 - 14) Pandolf, K.B. ; Effects of physical training and cardiorespiratory physical fitness on exercise-heat tolerance : recent observation. *Med. Sci. Sports*, 11, 60-65 (1979)
 - 15) Takamata, A., Nagashima, K., Nose, H. and Morimoto, T. ; Role of plasma osmolality in the delayed onset of thermal cutaneous vasodilation during exercise in humans. *Am. J. Physiol.*, 275, R286-290 (1998)
 - 16) Taylor, W.F., Johnson, J.M., Kosiba, W.A. and Kwan, C.M. ; Cutaneous vascular responses to isometric handgrip exercise. *J. Appl. Physiol.*, 66, 1586-1592 (1989)
 - 17) Van Beaumont, W. and Bullard, R.W. ; Sweating : its rapid response to muscular work. *Science*, 141, 643-646 (1963)
 - 18) Van Beaumont, W. and Bullard, R.W. ; Sweating : exercise stimulation during circulatory arrest. *Science*, 152, 1521-1523 (1966)
 - 19) Vissing, S.F., Scherrer, U. and Victor, R.G. ; Stimulation of skin sympathetic nerve discharge by central command. Differential control of sympathetic outflow to skin and skeletal muscle during static contraction. *Circ. Res.*, 69, 228-238 (1991)
 - 20) Yamazaki, F., Sone, R. and Ikagami H. ; Responses of sweating and body temperature to sinusoidal exercise. *J. Appl. Physiol.*, 76, 2541-2545 (1994)