

## 体温上昇に伴う換気量亢進反応に対する トレーニング効果に関する研究

西保 岳<sup>1)</sup>・本田 靖<sup>2)</sup>・藤井直人<sup>3)</sup>  
小川剛司<sup>3)</sup>・一之瀬真志<sup>4)</sup>・林 恵嗣<sup>5)</sup>

### Effects of heat acclimation on the hyperventilation induced by the increase in body temperature during exercise

NISHIYASU Takeshi, HONDA Yasushi, FUJII Naoto  
OGAWA Takeshi, ICHINOSE Masashi, HAYASHI Keiji

#### 緒言

近年の熱中症件数の著しい増加に見られるように、暑熱環境下での各種スポーツにおける安全確保は極めて重要であると考えられる。さらに、競技者は、アテネのような暑熱環境においてもパフォーマンスを發揮せねばならないことから、暑熱下において運動能力を高める方法やそのメカニズムを明らかにすることは、スポーツ科学において重要な課題である。我々は昨年、暑熱下運動後に下肢を短時間冷却することによって、その後の運動時に換気量の有意な減少が見られたことを報告<sup>1)</sup>し、さらに今年、暑熱下運動時の換気量上昇が体温上昇と密接な関係にあることを見出した<sup>2)</sup>。すなわち、暑熱運動時に見られる苦しさの一つとして換気量の亢進(呼吸困難感)があり、このことが暑熱時の運動能力や安全確保に大きく関わる可

能性が示唆された。しかし、この体温上昇に伴う換気量増加と有酸素能力との関係やトレーニング効果に関してまったく明らかではない。そこで、本研究では、暑熱順化プログラム(7日間の暑熱下運動)によって、運動時の皮膚血流量増加の体温調節反応は向上するのか、またその時に体温上昇に伴う換気量増加反応が減少するのか?を検討することを目的とした。

#### 方法

被験者は7名の健康な男性[年齢:  $25.4 \pm 0.4$  (SEM) 才、身長:  $169.3 \pm 1.9$  cm、体重:  $67.5 \pm 2.0$  kg、最高酸素摂取量(Peak Oxygen Uptake:  $\dot{V}O_{2peak}$ ):  $46.0 \pm 2.3$  ml/kg/min]であった。実験は、 $\dot{V}O_{2peak}$ の測定と暑熱下運動テストを、暑熱順化トレーニング前後に行った。

図1: 実験プロトコル(全体)



- 1) 人間総合科学研究科 体育科学専攻
- 2) 人間総合科学研究科 ヒューマンケア科学専攻
- 3) 人間総合科学研究科・体育科学専攻
- 4) 日本学術振興会特別研究員
- 5) 21世紀COE特別研究員

### VO<sub>2peak</sub>測定

VO<sub>2peak</sub>測定は環境温25℃、相対湿度50%に設定した環境制御室内において、セミリカンベント姿勢で運動を行えるように改良した自転車エルゴメーターを用いて行った。まず、被験者は30 Wの負荷でウォーミングアップを行い、1分の休息の後、60 Wから1分ごとに15 Wずつ負荷を漸増させて疲労困憊に至るまで運動を行った。得られたデータから酸素摂取量(Oxygen Uptake:VO<sub>2</sub>)を60秒毎に平均して求め、その最高値をVO<sub>2peak</sub>とした。

### 暑熱下運動テスト

被験者は、体重を計測し、環境温37℃、相対湿度50%に設定した環境制御室内にあるセミリカンベント姿勢で運動を行えるように改良した自転車エルゴメーターのイスに座って運動を行った。測定開始後約5分間はコントロール条件の測定を行った。コントロール条件の測定後、50%VO<sub>2peak</sub>強度での自転車運動を40～60分間行った。運動中、扇風機を用いて正面より微風(約0.2m/s)を被験者の体にあてた。運動中、被験者のT<sub>es</sub>が39.0℃に達した場合、もしくは被験者が耐えられ

なくなった場合に測定終了とした。運動終了直後に指先から採血を行い、その後、タオルで汗をふき取った後、採尿と体重計測を行った。

### 暑熱順化トレーニング

被験者は、VO<sub>2peak</sub>の測定と暑熱下運動テストを終えた後、暑熱下トレーニングを行った。トレーニングは、環境温37℃、相対湿度50%に設定した環境制御室内において、20分の自転車運動(50%VO<sub>2peak</sub>強度)を10分の休息を挟んで4回行い、これを6日間連続で行うというものであった(表1)。

### 測定項目など

測定項目は食道温(T<sub>es</sub>)、皮膚温、前腕血流量、心拍数、血圧、換気量(VE)、呼吸回数、一回換気量、呼気終末二酸化炭素分圧、RPE、体重、尿量、血漿浸透圧、血漿量変化(ヘモグロビンとヘマトクリットの値から求めた)であった。暑熱下トレーニングでは、食道温、心拍数、体重及びRPEのみを測定した。皮膚血管の拡張度合いを表す指標である前腕血管コンダクタンス(FVC)は、

図2：暑熱下運動テストプロトコル

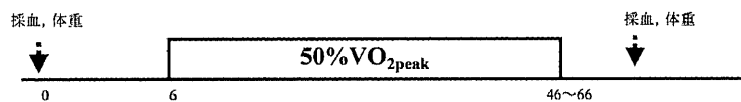


図3：暑熱順化トレーニングプロトコル

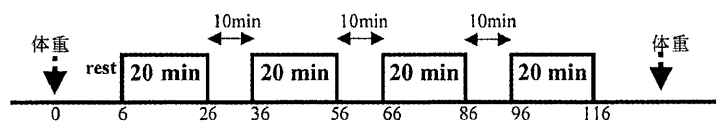


表1：トレーニング前後の体重及びVO<sub>2peak</sub>の変化

n = 7

variables	pre training	post training
body weight	67.5±2.0	67.3±1.7 NS
VO <sub>2peak</sub> , ml/min	3090.6±90.2	3304.1±88.8 *
VO <sub>2peak</sub> , ml/kg/min	46.0±2.3	49.3±2.0 *

Values are Mean ± SE.

\*, Significantly different between pre and post training (P<0.01).

前腕血流量を平均血圧で割って求めた。運動中の  $T_{es}$  の上昇に対する FVC の増加反応は、 $T_{es}$  に対して FVC の値をプロットし、FVC 増加の深部体温閾値、深部体温閾値以降の  $T_{es}$  と FVC の直線関係の傾き、FVC の最大値をそれぞれ求め、評価した。運動中の体温上昇に対する換気亢進反応は、 $T_{es}$  に対して  $\dot{V}E$  の値をプロットし、直線回帰分析を行うことで評価した。

統計処理

暑熱トレーニング前後の比較には t 検定を用いた。有意性の判定には危険率 5% 以下を採用した。

結果

$\dot{V}O_{2peak}$

暑熱順化トレーニング前 (絶対値: 3090.6 ± 90.2 ml/min、体重当たり: 46.0 ± 2.3 ml/kg/min)

と比べて、暑熱順化トレーニング後 (絶対値: 3304.1 ± 88.8 ml/min、体重当たり: 49.3 ± 2.0 ml/kg/min) に、有意に増加した (表 1)。

暑熱下運動テスト

運動開始前の  $T_{es}$  は、暑熱順化トレーニング前 (36.70 ± 0.06 °C) と比べて、暑熱順化トレーニング後 (36.38 ± 0.09 °C) に、有意に低下した。 $T_{es}$  に対する FVC の反応は、FVC 増加の深部体温閾値は、暑熱順化トレーニング前 (36.93 ± 0.09 °C) と比べて、暑熱順化トレーニング後 (36.45 ± 0.10 °C) に、有意に低下し、深部体温閾値以降の  $T_{es}$  と FVC の直線関係の傾きは、暑熱順化トレーニング前 (12.8 ± 1.5 ml/100ml/min/100mmHg/°C) と比べて、暑熱順化トレーニング後 (20.5 ± 2.9 ml/100ml/min/100mmHg/°C) に、有意に増加し、FVC の最大値は、暑熱順化トレーニング前 (13.1 ± 1.7

図 4: 暑熱順化トレーニング前後の食道温と前腕血管コンダクタンスの関係 (1 人の被験者のデータ)

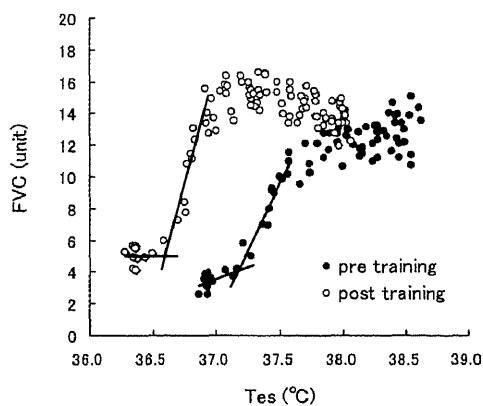


表 2: 暑熱順化トレーニング前後の食道温と前腕血管コンダクタンス

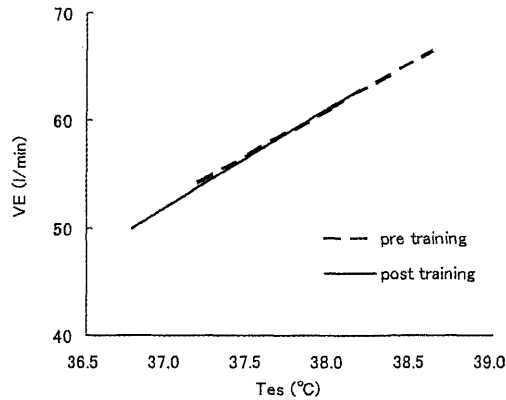
n = 7

variables	pre training	post training
pre $T_{es}$ (°C)	36.70±0.06	36.38±0.09 *
FVC		
base line, ml/100ml/min/100mmHg	4.4±0.8	4.4±0.7 NS
threshold, °C	36.93±0.09	36.45±0.10 *
slope, ml/100ml/min/100mmHg/°C	12.8±1.5	20.5±2.9 *
max, ml/100ml/min/100mmHg	13.1±1.7	15.5±2.0 *

Values are Mean ± SE. FVC, forearm vascular conductance.

\*, Significantly different between pre and post training (P<0.001).

図5：暑熱トレーニング前後の食道温と換気量の関係



ml/100ml/min/100mmHg) と比べて、暑熱順化トレーニング後 ( $15.5 \pm 2.0$  ml/100ml/min/100mmHg) に、有意に増加した。  $T_{es}$  と VE の直線関係の傾きは、トレーニング前後で有意に変化しなかった ( $8.6 \pm 3.1$  l/min/°C vs  $9.3 \pm 3.7$  l/min/°C)。

#### 考察

本研究では、暑熱順化プログラム(7日間の暑熱下運動)によって、運動時の皮膚血流量増加の体温調節反応は向上するのか、またその時に体温上昇に伴う換気量増加反応が減少するのか?を検討することを目的として実験を行った。得られた主な知見は、7日間の暑熱トレーニングによって、1)皮膚血流量増加に関する体温調節反応は顕著な向上が見られたが、2)体温増加に対する換気充進反応に対する効果は見られなかった、である。

我々は昨年、暑熱下運動後に下肢を短時間冷却することによって、その後の運動時に換気量の有意な減少が見られたことを報告<sup>1)</sup>し、さらに今年、暑熱下運動時の換気量上昇が体温上昇と密接な関係にあることを見出した<sup>2)</sup>。すなわち、暑熱運動時に見られる苦しさの一つとして換気量の充進(呼吸困難感)があり、このことが暑熱時の運動能力や安全確保に大きく関わる可能性が示唆された。さらに、昨年、最大下( $50\% \dot{V}O_{2peak}$ )の長時間(60分)の動的運動時におけるこの体温上昇に伴う換気充進反応は、体温調節機能の指標である皮膚血管拡張反応の感受性や有酸素運動能力( $\dot{V}O_{2peak}$ )

と負の相関関係があり、さらに、皮膚血管拡張反応の感受性は  $\dot{V}O_{2peak}$  と正の直線関係があることを学会報告した<sup>3)</sup>。先行研究から、皮膚血管拡張反応は暑熱順化によって向上することが示されていることから、上記の関係と加味して考えると、体温上昇に伴う換気充進反応が短期の暑熱順化トレーニングによって変化する可能性が考えられる。本研究では、このような経緯から、暑熱順化トレーニング前後での体温上昇に対する換気充進反応を比較した。

その結果、皮膚血流量増加に関する体温調節反応は顕著な向上が見られたが、体温増加に対する換気充進反応に対する効果は見られなかった。今回行った7日間の暑熱順化プログラムは、その前後にて最大酸素摂取量が7%増加し、皮膚血流反応は向上し、同一強度の運動を行ったときの食道温上昇が低下していることから、暑熱順化プログラムとしては非常に有効であったと考えられる。しかしながら、体温上昇に対する換気充進反応には、トレーニング前後で差がなかったことから、この換気反応には暑熱順化反応が見られない可能性が示唆された。先に述べたように、横断的研究においては、体温上昇に対する換気充進反応は、有酸素能力(最大酸素摂取量)や皮膚血流量増加反応と相関した。有酸素能力と皮膚血流増加反応が相関することが従来から報告されていることを加味して考察すると、体温上昇に対する換気充進反応は、皮膚血流反応のような体温調節反応とは直接関与せず、有酸素能力の向上とより密接

に関与しているかもしれない。しかしながら、体温調節反応には個人差が大きいことと今回の被験者数が7名と少ないことから、今後被験者数を加えての検討も必要とされるかもしれない。さらに、今回の暑熱順化では、最大酸素摂取量は7%の増加であり、今後、最大酸素摂取量増加による効果についての研究も期待される。

#### 参考文献

- 1) Hayashi K, Honda Y, Ogawa T, Wada H, Kondo N and Nishiyasu T. Effects of brief leg cooling after moderate exercise on cardiorespiratory responses to subsequent exercise in the heat, *Eur J Appl Physiol.* 92:414-42, 2004
- 2) Hayashi K, Honda Y, Ogawa T, Kondo K, and Nishiyasu T. Relationship between ventilatory response and body temperature during prolonged sub-maximal exercise. *J Appl Physiol.* 100(2):414-20, 2006
- 3) 林 恵嗣、本田 靖、小川 剛司、近藤 徳彦、西保 岳 運動時における体温上昇に伴う換気亢進反応と有酸素運動能力との関係、運動と体温の会 9月 岡山、2005