

低温環境における運動前の受動的体温加温が 高強度運動中の生理的応答に及ぼす影響

松本 実* 加藤貴英** 山根 基*** 山本高司**** 小坂光男****

Effect of passive warming up before exercise on physiological responses
during heavy exercise in a cold environment

Minoru MATSUMOTO, Takahide KATO, Motoi YAMANE,
Takashi YAMAMOTO and Mitsuo KOSAKA

Abstract

The purpose of this study was to examine the effect of passive warming up before exercise on physiological responses during heavy exercise in a cold environment. Five male subjects participated in this study. All measurements were taken at a room temperature of 16°C. In the passive warming up experiment (PW), bilateral extremities were immersed in hot water at 42°C for 20 min before exercise. In the cold exposure experiment (CE), subjects were sat for in the room temperature of 16°C for 35min before exercise. The exercise load was a 6-min heavy cycle exercise at 75%VO₂max (above lactate threshold). Gas exchange parameters (oxygen uptake, CO₂ output, ventilation, respiratory exchange rate), heart rate, rectum temperature, and RPE were measured during both experiments. Blood samples were taken immediately, and at 1, 3, 5, 7, 9, 12, 15 min after exercise to determine blood lactate concentration. Oxygen uptake was almost the same in the both experiments. Peak blood lactate concentration after exercise was significantly lower ($P < 0.05$) in PW ($12.8 \pm 1.9 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$) than in CE ($13.8 \pm 2.5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$). Mean heart rate during exercise was significantly higher in PW ($159 \pm 8 \text{ beat} \cdot \text{min}^{-1}$) than in CE ($153 \pm 6 \text{ beat} \cdot \text{min}^{-1}$). It is considered that the lower maximal blood lactate concentration in PW may be attributed to decreased anaerobic energy production during exercise due to higher body temperature.

【目的】

競技の前にはパフォーマンスの向上を目的として、ウォーミングアップが行われる。そのウォーミングアップによるパフォーマンス向上の要因の一つに体温の上昇が挙げられる¹⁾⁶⁾。

しかし、体温の上昇が運動パフォーマンスに与える影響は、環境温や運動強度によって異なると考えられるため、さらに詳細な検討が必要となる。

低温環境に暴露されると筋や皮膚など末梢組織の温度は著しく低下し¹⁾、骨格筋の収縮機能

*研究生, **助手, ***大学院生, ****教授

は変化すると考えられる。筋収縮に重要な働きをするアデノシ三リン酸 (ATP) の分解速度は、筋温の低下に伴い遅くなり⁵⁾、ミトコンドリアにおける有気的な ATP の再合成能力は低下する¹⁵⁾。また、筋温が低い状況では、最大張力の低下⁴⁾や、筋自体の粘性抵抗の増加²⁾がおこる。このように、低温環境では体温の低下が筋収縮に対して様々な影響を及ぼし、運動パフォーマンスに大きな影響を与えると考えられる。したがって、低温環境では運動前のウォーミングアップによる体温の上昇がパフォーマンス向上に対して重要な働きをすると推測される。

そこで本研究では、低温環境下で運動前の体温を受動的加温によって変化させ、その後に行う高強度運動時の生理的応答への影響を検討し、さらにウォーミングアップのパフォーマンス向上効果に対する体温上昇の影響の有無を明らかにすることを目的とする。

【方法】

中京大学運動生理学研究室に所属する大学院生の男性 5 名を被検者とした。その身体的特徴は、年齢 25 ± 1.8 才、身長 1.72 ± 0.03 m、体重 67.1 ± 5.5 kgであった。なお本研究は、中京大学体育学研究科倫理委員会規定の「人を対象とする研究に関する倫理指針」に基づき、被検者に事前に実験の目的・内容についての説明を行い、本研究の主旨および内容を理解した上で参加することの承諾を得た。

予備実験

本実験における運動強度の設定の為に、予備実験として最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_2\max$)、および乳酸閾値 (lactate threshold: LT) を測定した。室温 24°C 、相対湿度40%の人工気候室 (タバイエスベック社製) 内において、自転車エルゴメーター (コンビ社製) を用いた漸増負荷運動を、30W より開始し、90秒毎に30W ずつ増加させ、疲労困憊に至るまで継続した。ペダル回転数は毎分60回転と

した。

運動中のガス交換パラメーターである酸素摂取量、二酸化炭素排出量、分時換気量、および呼吸交換比 (それぞれ $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}E$ 、および RER) は自動呼気ガス分析機 (ミナト医科学社製: AE-300S) を用いて測定した。同時に心拍数は心電計 (フクダ電子製: Dyna Scope DS-502) を用いて胸部双曲誘導の心電図法によって記録した。血中乳酸濃度を測定するために、各強度の運動負荷の終了直前に採血をした。採血は、ヘパリン処理された $20\mu\text{l}$ の毛細管に指先から採取し、乳酸分析器 (EKF 社製: BIOSEN 5040) を用いて分析をした。LT の決定は、 $\dot{V}O_2$ を横軸に、血中乳酸濃度を縦軸にとって作図し、血中乳酸濃度が非直線的に急上昇を開始する直前の点とした。

本実験

実験プロトコルを図 1 に示す。室温 16°C 、相対湿度40%の人工気候室内において総ての実験を実施した。被検者の着衣は短パンと半袖のシャツとした。

受動的加温 (Passive warming up: PW) 実験は、気候室内で10分間の座位安静後、水温 42°C に調節した浴槽に大腿部の中間部の高さまで浸水させながら20分間の座位安静を行い、その後5分間の座位安静行った後、運動を実施した。低温暴露 (Cold Exposure: CE) 実験は、運動前に35分間の座位安静後、運動を実施した。両実験は少なくとも48時間以上の間隔をとって行った。本実験で用いた運動は、血中乳酸濃度の増加を誘起するように、被検者の LT よりも高い $75\% \dot{V}O_2\max$ の自転車こぎ運動とし、持続時間は6分間とした。

ガス交換パラメーター及び、心拍数は前述の自動ガス分析器、心電計を用いて測定し、CE 実験と PW 実験の両実験とも実験開始から、運動終了後15分目まで測定した。採血は、運動直前と運動終了直後、3、5、7、9、12、および15分後に行った。血中乳酸濃度の分析には前述の乳酸分析器を用いた。直腸温は、サーミスタ温度計 (センサテクニカ社製) を用いて測定

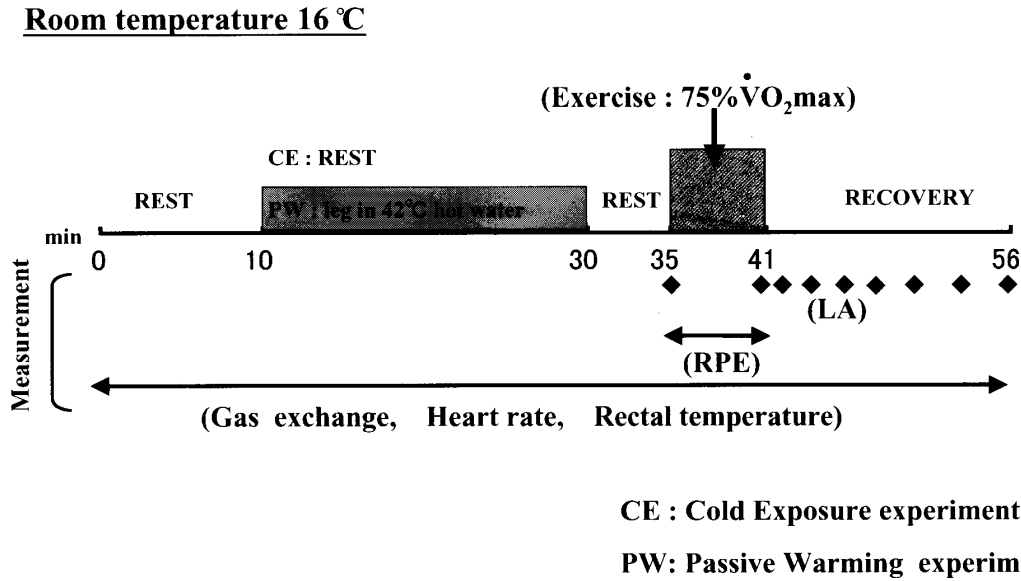


Fig. 1 Experimental protocol.

した。主観的作業強度 (rating of perceived exertion: RPE) を、運動中 1 分毎に測定した。

各データは平均値±標準偏差で表した。統計処理は統計ソフト SPSS 9.0J for Windows を用いて T 検定を行い、有意水準は危険率 5 % 以下とした。

【結果】

直腸温 (図 2) は、運動開始 3 分前から運動終了 15 分後まで PW 実験の方が CE 実験よりも有意に高かった。

運動前の血中乳酸濃度 (表 1) は、CE 実験 ($1.3 \pm 0.2 \text{ mmol/l}$) と、PW 実験 ($1.3 \pm 0.4 \text{ mmol/l}$) で有意差は認められなかった。しかし、運動後の最大血中乳酸濃度は、PW 実験 ($12.8 \pm 1.9 \text{ mmol/l}$) が、CE 実験 ($13.8 \pm 2.5 \text{ mmol/l}$) よりも有意に低い値を示した ($P < 0.05$)。

ガス交換パラメーター (表 1) では、RER の運動中の最大値が PW 実験 (1.24 ± 0.09) で、CE 実験 (1.28 ± 0.09) よりも有意に低い値を示した ($P < 0.05$)。しかし、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}E$ に実験中、差は見られなかった。

運動中の心拍数の平均値 (表 1) は、PW 実験 ($159 \pm 8 \text{ beat} \cdot \text{min}^{-1}$) の方が CE 実験 ($153 \pm$

$6 \text{ beat} \cdot \text{min}^{-1}$) よりも有意に高い値を示した ($P < 0.05$)。

運動中の RPE の平均値 (表 1) は、PW 実験 (16 ± 1) が CE 実験 (17 ± 0) よりも有意に低い値を示した ($P < 0.05$)。

【考察】

本研究は、低温環境における運動前の受動的加温が高強度運動時の生理的応答に対する影響を検討した。

体温について

本研究の結果から、直腸温で、安静値からの経時的な変化が、CE 実験より PW 実験で運動開始 3 分前から運動終了まで有意に高い値を示した。先行研究において、低温環境ではないが、30 分間の下肢温浴によって、安静時から筋温が 2.5°C 程度上昇したことを観察している⁴⁾¹⁰⁾。このことから、本研究では筋温は測定していないが、下肢の筋温は PW 実験では上昇し、CE 実験では低下していたと推測される。

エネルギー代謝について

本研究において運動後の最大血中乳酸濃度は、CE 実験より PW 実験で有意に低い値を示し

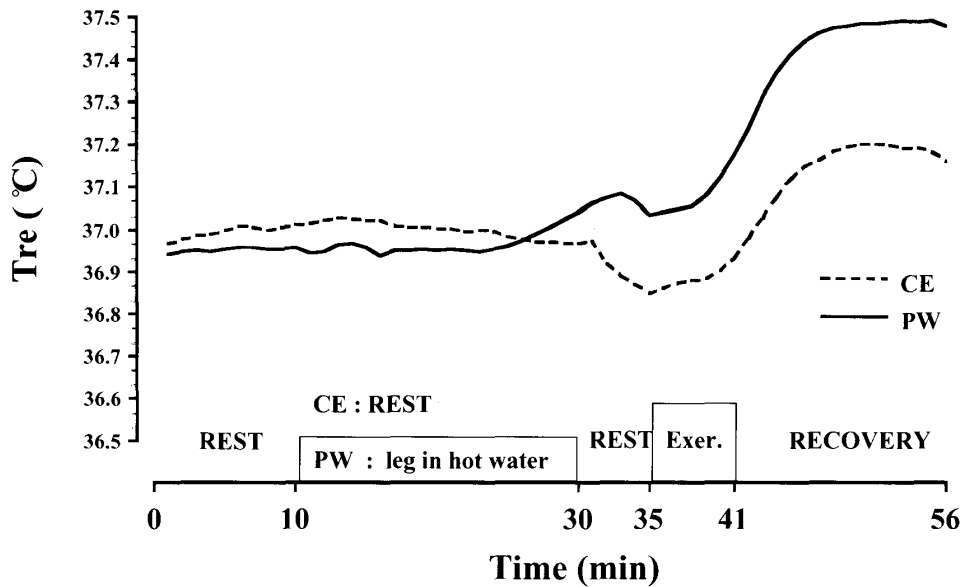


Fig. 2 Changes in Rectum Temperature.

Table. 1 Values are mean \pm SD (n=5). ※: $P < 0.05$ CE VS. PW.

Resting values, average values and peak values during exercise of each parameter (but peak values of Lactate show maximal blood lactate concentrations after exercise).

	Rest		Ave		Peak	
	CE	PW	CE	PW	CE	PW
$\dot{V}O_2$ (ml \cdot min $^{-1}$)	292 \pm 48	273 \pm 48	2079 \pm 274	2104 \pm 278	2436 \pm 345	2500 \pm 353
Lactate (mmol \cdot l $^{-1}$)	1.3 \pm 0.2	1.26 \pm 0.4	—	—	13.8 \pm 2.5	12.8 \pm 1.9※
$\dot{V}CO_2$ (ml \cdot min $^{-1}$)	249 \pm 36	221 \pm 29	2436 \pm 231	2391 \pm 231	2911 \pm 309	2914 \pm 330
RER	0.86 \pm 0.04	0.81 \pm 0.07	1.15 \pm 0.08	1.11 \pm 0.07	1.28 \pm 0.09	1.24 \pm 0.09※
$\dot{V}E$ (ml \cdot min $^{-1}$)	9.3 \pm 2.0	9.0 \pm 1.3	78.1 \pm 8.2	72.6 \pm 8.9	108.0 \pm 15.0	100.6 \pm 15.2
HR (beat \cdot min $^{-1}$)	72 \pm 9	79 \pm 6	153 \pm 6	159 \pm 8※	170 \pm 6	176 \pm 6
RPE	—	—	17 \pm 0	16 \pm 1※	20 \pm 1	18 \pm 2

た。血中乳酸濃度の上昇は、無酸素性のエネルギー代謝を反映するとされている。このことから、本研究の結果ではPW実験はCE実験と比較して解糖系によるエネルギー供給が減少したと考えられる。骨格筋レベルでは筋温が低下した状況では、ATPの分解速度の低下⁵⁾、ミトコンドリアの有機的ATP供給能力の低下¹⁵⁾、末梢組織における酸素の解離の減少¹²⁾等が起り、有機的エネルギー供給に対して不利に働くと考えられる。そして、その代償として無酸素性エネルギー供給の依存度が高くなると推測される。その他の無酸素性エネルギー供給が増加する可能性としては、筋線維の収縮特性や運動単

位の動員の変化が考えられる²⁾。これら、いくつかの要因によって本研究では、血中乳酸濃度がPW実験の方がCE実験よりも低い値を示したと推測される。

ガス交換パラメーターについて

ガス交換パラメーターにおいて、安静時の $\dot{V}O_2$ は、本実験でのCE、PWの両実験の結果と予備実験との間に差は見られなかった。低温環境では皮膚血管の収縮による皮膚血流量の減少によって深部体温の保持が出来なくなると、「ふるえ」と「非ふるえ」熱産生が起り、それに伴って $\dot{V}O_2$ が増加する⁷⁾。先行研究では、環境

温15℃程度ではふるえが起こらないと報告されている¹⁶⁾。本研究では、PW実験とCE実験ともに目視による確認において明白なふるえは観察されなかった。したがって、本研究における安静時 $\dot{V}O_2$ の結果から、CE実験、PW実験ともに「ふるえ」に伴う $\dot{V}O_2$ の増加はなかったと考えられる。

PW実験とCE実験と比較すると、RERの最大値がCE実験よりもPW実験で有意に低い値を示した。血中に乳酸が放出されると、これを緩衝するために重炭酸緩衝系が働く。このことにより過剰の CO_2 が排出され、RERが上昇する。さらに CO_2 濃度の上昇は呼吸中枢を刺激し、換気量を増加させる⁹⁾¹⁴⁾。従って、本実験の血中乳酸濃度とRERの結果から、PW実験では運動中に血中に放出された乳酸がCE実験より少なかったと考えられる。

心拍数について

本研究では、運動中の心拍数の平均値はPW実験がCE実験よりも高かった。先行研究では、体温の低い状態では、体温の低下に伴い運動時の心拍数が減少すると報告しており⁸⁾、本研究結果と一致する。本研究における心拍数の結果も直腸温の上昇度が異なることから心拍数に差が見られたことが推測される。

ウォーミングアップとRPEについて

本研究の結果において、RPEの平均値がPW実験において有意に低かったことは、低温環境での高強度運動時には、体温が高い方が精神的負担度を低下させることになり、パフォーマンス向上にとって有利に働くと考えられる。また、低温環境下において受動的加温を行った結果、先行研究⁷⁾の運動によるウォーミングアップと同様に血中乳酸濃度が低下した。乳酸の蓄積による筋細胞pHの低下は、筋収縮を抑制するため運動パフォーマンスに対して不都合である¹³⁾。この考え方をとれば、低温環境では、運動前の体温が高いほうが乳酸の蓄積を減少させ、運動パフォーマンス向上に対して有利に働くと考えられる。よって、低温環境では、

ウォーミングアップのパフォーマンス向上効果は、体温の上昇が一つの要因であることが示唆された。

【まとめ】

本研究では、低温環境における運動前の受動的な身体加温が、短時間・高強度運動に対する身体機能に及ぼす影響を調査した。気温16℃の低温環境で、PW実験（運動前下肢温浴）とCE実験（運動前座位安静）の2条件で、6分間の75% $\dot{V}O_{2max}$ 強度の自転車こぎ運動を行った。その主な結果として、PW実験はCE実験と比較して、運動前から運動終了後まで直腸温が高く、運動後の最大血中乳酸濃度は低かった。このことから、低温環境では、運動前の体温が高い方が短時間運動のパフォーマンスに対して有利であると考えられる。そして、低温環境でのウォーミングアップのパフォーマンス向上効果には、体温の上昇が一つの要因であることが示唆された。

【謝辞】

本研究において実験遂行および論文作成にあたり、多々ご支援、ご協力を頂いた中京大学体育学研究所、及び中京大学特定研究助成（特定研究2002）に対し心よりお礼申し上げます。そして、実験被検者として参加して頂きました皆様、ならびに多くの激励を頂きました運動生理学研究室の皆さまにあらためて感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 青木純一郎, 佐藤佑, 村岡功編著 スポーツの生理学 市村出版 2001 41-45
- 2) Beelen A., Sargeant A.J., Effect of lowered muscle temperature on the physiological response to exercise in men. Eur. J. Appl. Physiol. 63 387-392,1991
- 3) Burnley M., Doust J.H., Jones AM. Effects

- of prior heavy exercise, prior sprint exercise and passive warming on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 87(4-5): 424-32, 2002
- 4) Davies C.T., Mecrow I.K., White M.J., Contractile properties of the human triceps surae with some observations on the effects of temperature and exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 49(2): 255-69, 1982
- 5) Ferretti G., Cold and Muscle Performance. *Int J Sports Med.* 13: S185-S187, 1992
- 6) 後藤真二, ウォーミングアップの生理学
コーチング・クリニック 1, 6-10, 2001
- 7) 平田耕造, 井上芳光, 近藤徳彦編集, 体温
ナップ 57-61, 56-167, 2002
- 8) Jose A.D., Stitt F., Collison D., Related The effects of exercise and changes in body temperature on the intrinsic heart rate in man. *Am. Heart. J.* 79(4): 488-98, 1997
- 9) 勝田 茂編著, 運動生理学20講 朝倉書店
91-96, 1993
- 10) Koga S., Shiojiri T., Kondo N., Barstow T.J., Effect of increased muscle temperature on oxygen uptake kinetics during exercise. *J. Appl. Physiol.* 83(4): 1333-8, 1997
- 11) Oksa J., Rintamaki H., Rissanen S., Muscle performance and electromyogram activity of the lower leg muscles with different levels of cold exposure. *Eur. J. Appl. Physiol.* 75(6): 484-90, 1997
- 12) Shiojiri T., Shibasaki M., Aoki K., Kondo N., Koga S. Effects of reduced muscle temperature on the oxygen uptake kinetics at the start of exercise. *Acta. Physiol. Scand.* 159(4): 327-33, 1997
- 13) Tesch P., Muscle fatigue in man. With special reference to lactate accumulation during short term intense exercise. *Acta. Physiol. Scand. Suppl.* 480: 1-40, 1980
- 14) Wasserman K., Whipp B.J., Koyal S.N., Beaver W.L., Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Appl. Physiol.* 35: 236-243, 1973
- 15) Willis W.T., Jackman M.R., Mitochondrial function during heavy exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26(11): 1347-53, 1994
- 16) Yoshida T., Nagashima K., Nakai S., Yori-moto A., Kawabata T., Morimoto T., Nonshivering thermoregulatory responses in trained athletes: effects of physical fitness and body fat. *Jpn. J. Physiol.* 48: 143-159, 1998