

高温条件下漸増運動負荷中の血中乳酸動態

千葉智則*・石井裕明**・矢野徳郎***

Kinetics of Blood Lactate During Incremental Exercise in Heat Condition

Tomonori CHIBA*, Hiroaki ISHII** and Tokuro YANO***

Summary

The purpose of the present study was to examine the blood lactate (La) kinetics during incremental exercise and recovery in heat condition. Ten male subjects (age; 19.8 ± 0.9 yrs, height; 172.9 ± 3.2 cm, body mass; 67.5 ± 4.8 kg, %Fat; 10.0 ± 0.9 %) performed an incremental exercise test ($20 \text{ watts} \cdot \text{min}^{-1}$) on two different conditions: an ambient temperature of 20°C and 50% relative humidity (control; CON) and 40°C and 50% relative humidity (heat trial; HT). Trials were conducted within a week in random order. Oxygen consumption ($\dot{V}\text{O}_2$) at submaximal intensities during incremental exercise was higher in HT compared with CON ($p < 0.05$). No difference in ventilatory threshold was observed between HT and CON. These results suggest that anaerobic metabolism at submaximal intensities during incremental exercise may be unchanged by HT. In contrast, exercise in HT resulted in a higher La above approximately $5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ and a significant difference in La was observed at 240 watts compared with CON ($p < 0.05$). La at exhaustion was higher in HT compared with CON ($8.5 \pm 1.4 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ vs $6.9 \pm 1.5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$, $p < 0.05$) but lower peak value of La in HT during recovery was observed compared with CON ($8.8 \pm 1.5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ vs $9.9 \pm 1.5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$, $p < 0.05$). In addition, La peak in HT appeared earlier during recovery than that in CON ($2.3 \pm 2.7 \text{ min}$ vs $7.1 \pm 2.4 \text{ min}$, $p < 0.05$). It is suggested from these results that higher level in La observed during incremental exercise in HT may be due to increase of La transfer from active muscle to blood.

Key words: blood lactate, incremental exercise, heat

I. 緒言

高温条件下で運動を行うと、体温調節応答が起っ

て皮膚血流量が増加し¹⁷⁾、それに伴って活動筋への血流量が減少するため、筋が低酸素状態になると推

* 東北学院大学教養学部人間科学科 (〒981-3105 仙台市泉区天神沢2-1-1)

Department of Human Science, Tohoku-Gakuin University

** 東北学院大学大学院人間情報学研究科博士課程 (〒981-3105 仙台市泉区天神沢2-1-1)

Doctoral Program in Human Informatics, Tohoku-Gakuin University

*** 北海道大学大学院教育学研究科 (〒060-0811 札幌市北区北11条西7)

Graduate School of Education, Hokkaido University

測されてきた^{2,19)}。その結果、高温条件下での運動時には無氣的代謝が亢進し乳酸の生成が高まるものと考えられてきた。しかし、Neilsen et al.^{8,13)}は高温条件下では活動筋の血流量は減少しないことを報告している。さらに、短時間の運動では糖代謝が高温条件によって影響を受けないとされている¹²⁾。

一方、高温条件下の運動では、常温下に比べ皮膚血流の増加と共に発汗量が増加する⁷⁾。この発汗量の増加と共に運動時の乳酸産生の増加は活動筋内の浸透圧を高めることが推定される。もしこのような現象が起れば、浸透作用により水分の細胞外液への移動は著しく低下するものと考えられる。したがって、高温条件下での運動では乳酸を細胞外液へすみやかに移動させることが望ましい。しかし、血中における乳酸は高温条件下で常温条件下より増加^{2,20,21)}あるいは変化しない^{6,8,11,13,16)}という報告があり、一定の結果が得られていない。

そこで、本実験では、高温条件下および常温下において漸増運動時の血中乳酸動態を検討することを目的とした。漸増負荷を用いる理由は、1) 漸増運動負荷時に表れる換気性作業閾値 (Ventilatory Threshold: VT) によって、無氣的代謝の始まりが高温条件によって亢進するか否かを検討できること、2) そのVT以降の負荷中および回復期の血中乳酸動態が活動筋から血中への乳酸の移動の様子を表す指標となること、の二点である。

II. 方法

A. 被験者

被験者は、年齢 19.8 ± 0.9 歳の健康な大学生男子10名であった。被験者の身体的特性は身長 172.9 ± 3.2 cm、体重 67.5 ± 4.8 kg、体脂肪率 $10.0 \pm 0.9\%$ であり、大学の運動部に所属し、週に5-6回定期的に身体トレーニングを実施していた。被験者は研究の目的、意義および測定手順とともに実験に伴う危険性について十分に説明を受けたのち、被験者が自主的に同意書に署名して実験に参加した。被験者には実験前日からアルコール摂取、喫煙、激しい運動を控えるように予め依頼した。実験は被験者の暑熱順化を避けるために2月におこなった。なお、本研究の実施は北海道大学研究科倫理委員会承認された。

B. 運動負荷テスト

被験者は常温下 (20℃, 相対湿度50%) および、高温下 (40℃, 相対湿度50%) の2つの環境条件下で運動負荷テストを行った。テスト間は少なくとも1週間の間隔をあけランダムにおこなわれた。漸増運動負荷テストは電磁式自転車エルゴメーター (75IIx: Combi) を用いておこなった。ペダリング速度は60rpmとし、4分間の0 wattでのウォーミングアップの後、1分毎に20wattの漸増負荷で被験者が疲労困憊に至るまで行った。

被験者は体重測定後に直腸温プローブを装着し、温湿度が一定となった環境制御室 (FJC-5500S: 富士医科産業) に入った。30分間の座位安静を保った後、安静時の測定を5分間行った。運動終了後、被験者は10分間安静を保ち、直腸温プローブを外した後再度体重を測定した。呼吸代謝装置 (AE-300s: MINATO) を用いて、安静時、運動時および運動終了後の安静回復期における換気量 ($\dot{V}E$)、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$)、終末呼気酸素濃度 (ETO_2) および終末呼気二酸化炭素濃度 ($ETCO_2$) を breath-by-breath で測定し、心拍数 (HR) と同期して20秒毎に平均出力した。また、直腸温 (T_{rec}) はサーミスター温度計 (K730: TECHNO SEVEN) を用いて安静時から安静回復期に至るまで連続的に測定を行った。安静時、運動時40watt毎、運動終了直後および回復期3, 5, 7, 10分に耳朶から25 μ lの血液をキャピラリーチューブに採取した。その血液を直ちに乳酸分析器 (1500SPORT: YSI) で分析し、血中乳酸値 (La) を求めた。

最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の判定基準は、i) $\dot{V}O_2$ の増加が前負荷段階の $2 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{BW} \cdot \text{min}^{-1}$ 未満となるレベリングオフ (leveling-off)、ii) 年齢から推定された最高心拍数 ($HR_{max} = 220 - \text{年齢}$) の90%以上、iii) 呼吸交換比 (RER) が1.15以上という3条件のうち2つ以上を満たすこととした⁴⁾。VTは次の基準に基づいて非侵襲的に決定した^{9,14)}。i) $\dot{V}O_2$ に対して $\dot{V}CO_2$ が非直線的に増加し始めた点、ii) 二酸化炭素当量 ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$) の上昇および呼気終末二酸化炭素分圧 ($PETCO_2$) の下降を伴わずに、酸素当量 ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$) と呼気終末酸素分圧 ($PETO_2$) が上昇し始めた点の2条件とし、二人の検者の判定によって総合的に決定した。

各被験者の漸増運動負荷テスト中の血中乳酸の動

態を比較するために、以下の指数関数式 (1) に近似させ、その係数 a および b を比較検討した。

$$La(\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}) = a\cdot e^{b\cdot x} \quad \dots (1)$$

ここで e ; 自然対数, x ; 負荷量 (watt) である。

C. 統計処理

すべての値は平均値 \pm 標準偏差で表した。常温下および高温下の二群間における平均値の差の検定には対応のある t 検定を用いた。漸増運動負荷テスト中の最大下負荷時及び負荷後における $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, HR, T_{rec} および血中乳酸動態の比較については、温度間要因および負荷強度間要因または経過時間間要因を考慮した反復測定の実験配置の分散分析によりおこなった。二元配置の分散分析において、交互作用および主効果に有意性が認められた場合は、有意な主効果が認められた独立変数について反復測定の実験配置の分散分析をおこない、その後、多重比較検定をおこなった。多重比較検定には Bonferroni の検定を用いた。すべての検定において統計的有意水準は 5%未満とした。統計処理には SPSS ver.10.0 for Macintosh を用いた。

III. 結果

A. 体重, 直腸温

Table 1に安静時, 運動時および回復期の測定項目を示した。体重は安静時および実験終了後で有意な差は認められなかったが, 減少分 (Δ kg) は高温下で有意に大きかった。 T_{rec} は安静時, 運動時および疲労困憊時に有意な差は認められなかった。回復期の T_{rec} は常温下では安定傾向であったが高温下では連続的に上昇した。反復測定の実験配置の分散分析後, 回復期の T_{rec} は温度間, 運動強度間要因で有意な交互作用が認められ, 常温下と高温下では異なる動態を示すことが明らかとなった。有意な交互作用が認められたため反復測定の実験配置の分散分析および多重比較検定をおこなった。その結果, 回復期 7分および10分では高温下で有意に高値を示した。回復期に観察されたピーク値は高温下で有意に高く, 高温下では10名全員において回復10分目にピーク値が観察された。

B. 心拍数, 換気量, 酸素摂取動態

HR は安静時 (HRrest), 最高心拍数 (HRmax) ともに常温下に比べ高温下で有意に高い値を示し, 運動中および回復期においても温度間要因に主効果が認められ, 高温下で有意に高かった。常温下と高温下における $\dot{V}E$ は安静時および回復期ともに同様の

Table 1 Parameters at rest, incremental exercise and recovery in control trial (CON) and heat trial (HT). Values are means \pm SD; $n=10$ subjects. *Significantly different from CON values, $P<0.05$.

		CON	HT
Body Mass (kg)	pre	67.5 \pm 4.8	67.7 \pm 4.6
	post	67.2 \pm 4.8	67.1 \pm 4.5
	Δ (kg)	0.3 \pm 0.1	0.7 \pm 0.2*
T_{rec} ($^{\circ}$ C)	rest	37.00 \pm 0.25	37.05 \pm 0.29
	exhaustion	37.34 \pm 0.32	37.51 \pm 0.36
	peak	37.76 \pm 0.37	38.34 \pm 0.43*
WRmax	(watt)	312 \pm 47	288 \pm 36.9*
HRrest	(bpm)	62 \pm 12	77 \pm 11
HRmax	(bpm)	189 \pm 9	196 \pm 7*
$\dot{V}E_{max}$	($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	148 \pm 23	141 \pm 20*
$\dot{V}O_{2max}$	($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	3.26 \pm 0.45	3.26 \pm 0.41
$\dot{V}O_{2VT}$	($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	1.82 \pm 0.38	1.81 \pm 0.37
La ($\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$)	rest	0.8 \pm 0.1	0.8 \pm 0.2
	exhaustion	6.9 \pm 1.5	8.5 \pm 1.4*
	peak	9.9 \pm 1.5	8.8 \pm 1.5*

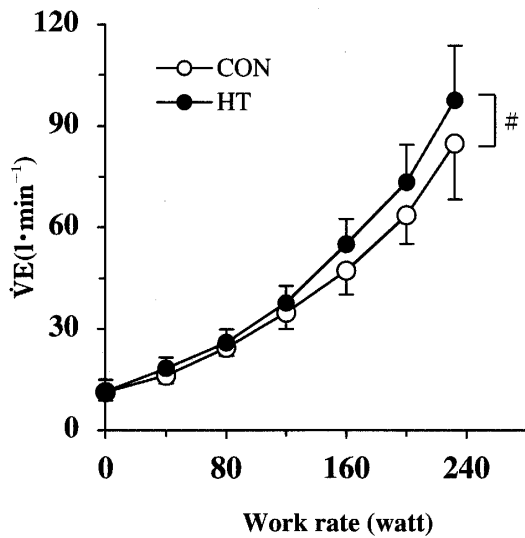


Fig. 1 Comparison of ventilation at submaximal intensities during incremental exercise in CON and HT. #main effect between CON and HT, $P < 0.05$. $n = 10$ subjects.

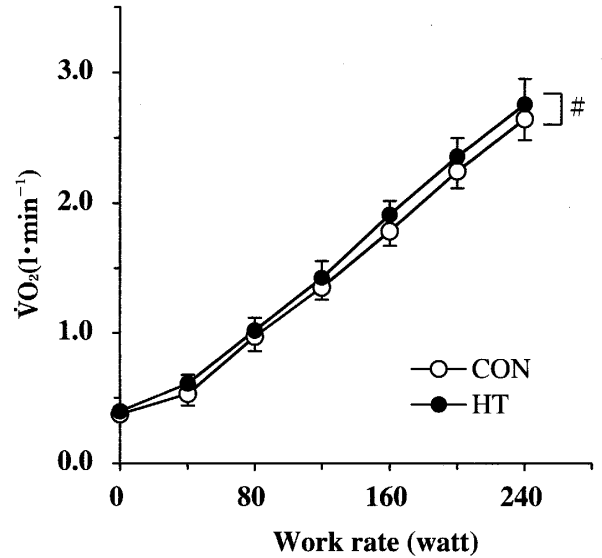


Fig. 2 Comparison of oxygen consumption at submaximal intensities during incremental exercise in CON and HT. #main effect between CON and HT, $P < 0.05$. $n = 10$ subjects.

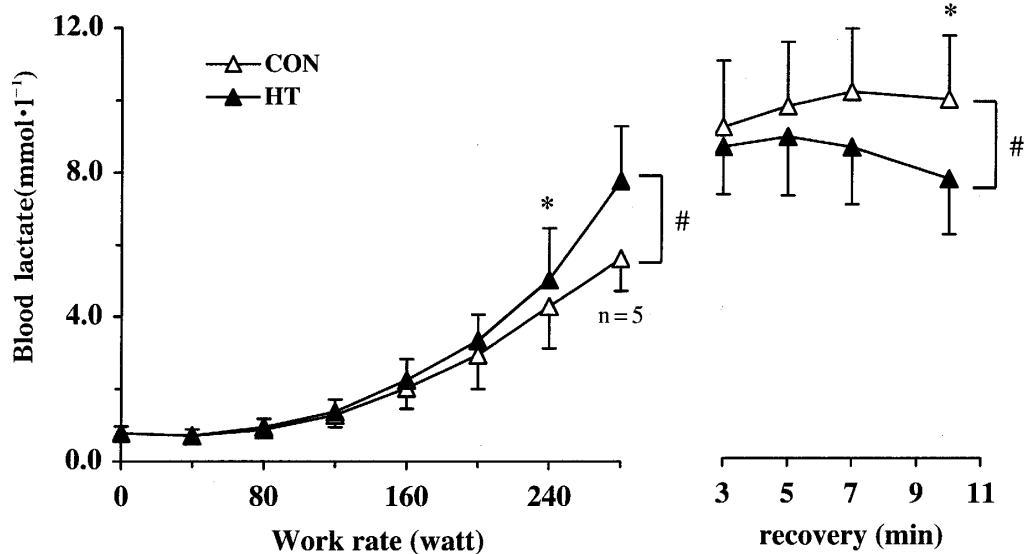


Fig. 3 Kinetics of blood lactate concentration at submaximal intensities during incremental exercise and the recovery in CON and HT. *significantly different from CON values at given work rate or recovery time, $P < 0.05$. # main effect between CON and HT, $P < 0.05$. $n = 10$ subjects except for 280 watts.

傾向がみられたが、運動中は温度間要因に主効果が認められ高温下で有意に高かった (Fig. 1). しかし、 $\dot{V}E_{max}$ は高温下で有意に低値を示した (Table 1).

Fig. 2に漸増運動負荷時の最大下負荷における $\dot{V}O_2$ の動態を示した。 $\dot{V}O_2$ は安静時から負荷強度の

上昇とともに増加したが、常温下、高温下ともに40watt時の $\dot{V}O_2$ には仕事量の増加に対する時間遅れの反応が見られた。安静時から240wattまでの $\dot{V}O_2$ は温度間要因に主効果が認められ、高温下で有意に高かった。呼気ガスから非侵襲的に決定されたVTにおける $\dot{V}O_2$ は、常温下と高温下の間有意な差は

認められなかった。同様に、 $\dot{V}O_{2max}$ には常温下と高温下の間には有意な差は認められなかった (Table 1)。

C. 血中乳酸動態

Fig. 3に最大下負荷中および回復期の血中乳酸の動態を示した。高温下では5名が280watt以前に疲労困憊に達したため、280wattでの両条件で得られたデータは5名のみであった。そのため、データの統計解析には240wattまでのデータとした。安静時から240wattにおける血中乳酸には有意な交互作用が認められ、血中乳酸は常温下と高温下では異なる動態を示した。これらのデータを用いて多重比較検定を行った結果、240wattでは常温下に比べて高温下で血中乳酸が有意に高かった。疲労困憊直後の血中乳酸は、常温下に比べ高温下で最大負荷 (WRmax) が0.92倍と低いにも関わらず、高温下で1.23倍と有意に高かった (Table 1)。一方、回復期の血中乳酸にも有意な交互作用が認められ、常温下と高温下では異なる動態を示し、高温下では10分目で有意に低値を示した。回復期に得られた血中乳酸のピーク値は常温下で有意に高く高温下の1.13倍であった。さらに、常温下では10名全員が負荷後3分目以降にピーク値が得られたのに対し、高温下では5名が疲労困憊直後に得られた。その平均時間は、常温下 (7.1 ± 2.4 min) に比べ高温下 (2.3 ± 2.7 min) で有意に早くピーク値が観察された。

式 (1) による血中乳酸の近似は常温下、高温下ともにきわめて良好であった ($r=0.937-0.998$)。この近似により求められた係数 a は常温下 (0.560 ± 0.142) と高温下 (0.535 ± 0.133) で有意な差が認められなかった。一方、係数 b は常温下 (0.00825 ± 0.00135) に比べ高温下 (0.00917 ± 0.00158) で有意に大きく、負荷量が増大するに従い血中乳酸は常温下に比べ高温下で上昇することが示唆された。Fig. 4に3名の被験者の最大下負荷中における血中乳酸と指数関数式 (1) で近似した指数関数曲線を示した。指数関数曲線はいずれも血中乳酸が約 $5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ 付近から差が生じ始め、高温下で上昇する傾向がみられた。この傾向は被験者10名中8名でも同様にみられ、他の2名は両温度条件で差がみられなかった。

IV. 考察

本研究より、 $\dot{V}O_2$ は高温下と常温下の両条件ともに40watt時に時間遅れの反応が観察された。また、最大下負荷時の $\dot{V}O_2$ 動態は両条件で異なり高温下で有意に高値を示した。さらに、VTは両条件の間には有意差はなかった。この結果は、高温下の運動時には酸素借は増加せず、無氣的代謝は亢進しなかったと考えられる。運動初期の酸素供給の遅れ (酸素借) に相当するエネルギーは無氣的代謝によって供給される。今回、高温下においても常温下と同等の $\dot{V}O_2$ の遅れ時間の反応が表れたこと (Fig. 1) から考えると、高温下では運動初期の酸素借が増加した可能性は低い。また、高温下では常温下に比べ同一負荷で $\dot{V}O_2$ が低下せずむしろ増加していたことは、活動筋への酸素供給が低下していなかったことを示している。さらに、VTが両条件下で差が認められなかったことから、高温下漸増運動における中程度の強度までは乳酸生成が増加していないことを示している。今回、常温下に比べ高温下で $\dot{V}O_2$ が増加したのは、換気量や心拍数増加等の影響により効率が低下したためであろう。

漸増運動後に観察された血中乳酸ピーク値は、高温下では常温下よりも低値を示した。高温下運動時の血中乳酸上昇の原因がVT以降の無氣的解糖亢進であるとするれば、血中乳酸ピーク値も高温下で上昇すると考えられる。今回、両条件のWRmaxが異なるので単純には比較できないが、高温下ではWRmaxが有意に低く、同様にピーク値も有意に低い結果からすると、高温下ではVT以降も乳酸生成が増加した可能性は低い。最近、Saunders et al.¹²⁾は糖代謝の律速酵素であるグリコーゲンフォスホリラーゼとピルビン酸脱水素酵素は、70% $\dot{V}O_{2max}$ で5分間という比較的短時間の運動中には高温条件の影響を受けないことを報告した。さらに、Febbraio¹⁾は高温下最大下運動時の筋肉糖代謝が増大する条件として0.5℃以上の深部体温の上昇を指摘している。今回、漸増運動負荷時に70% $\dot{V}O_{2max}$ 以上の強度となった時間は、すべての被験者において4-6分の範囲であり、安静時から疲労困憊までの深部体温の上昇が 0.46 ± 0.26 ℃であった結果から推測すると、今回の高温条件下での運動が糖代謝を亢進させた可能性は低いだろう。すなわち、高温下漸増運動負荷時の血中乳酸上昇は、筋の代謝性の変化による乳酸生成増加が原因ではないことを示唆し

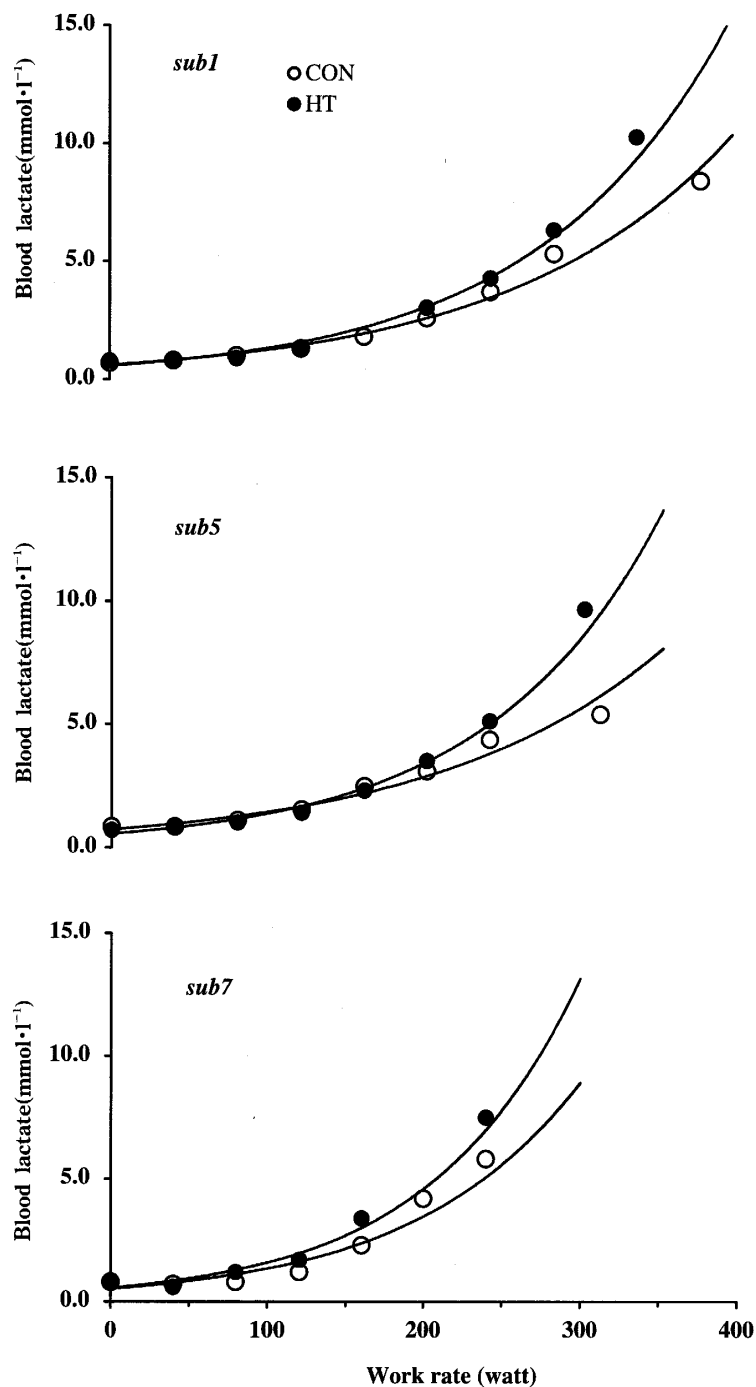


Fig. 4 Relationship between blood lactate concentration and work rate in CON and HT on three subjects (*sub1*, *sub5*, *sub7*).

ている。

漸増運動後の血中乳酸ピーク値の出現時間は、高温下ではほぼ疲労困憊直後であり常温下よりも早期に出現した。本研究で用いたような高い漸増率の漸増運動中には、血中乳酸ピーク値は疲労困憊の数分後に観察される⁹⁾。これは、高い漸増率では乳酸が細胞から細胞外へ移動する時間が少ないため、筋中

の乳酸と血中乳酸に較差が生じるためであると考えられる。その結果、漸増運動終了後には筋中では乳酸が産生されていないにもかかわらず血中では乳酸ピーク値が観察される。したがって、高温下では血中乳酸のピーク値がほぼ疲労困憊直後に観察されたことは、筋と血中とでは乳酸の較差が無くなっていたことを示唆している。おそらく、このことは、高

温下の運動時には常温下に比べて乳酸が筋から血液へ多く移動していたために生じたと考えられる。その結果、高温下の漸増運動中には血中乳酸の上昇が生じたのだろう。

各被験者の血中乳酸と負荷を回帰曲線で近似した結果、 $5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ 付近から常温下に比べ高温下で上昇傾向が生じていた。これまで高温条件下運動時には血中乳酸は常温条件下より増加あるいは有意に変化しないという報告があり、一定の結果が得られていない。Smolander et al.¹⁶⁾は常温、高温条件下で漸増運動負荷を実施した結果、血中乳酸には差がないことを報告している。同様に、冷涼あるいは常温環境と高温環境では運動時の血中乳酸に有意差がないことを報告している研究は多い^{6,8,11,13)}。しかし、Smolander et al.の実験では、血中乳酸ピーク値は常温条件で平均 $4.8 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ 、高温条件でも $5.1 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、温度条件で血中乳酸に差がないとした他の研究においても、運動時に得られた血中乳酸はいずれも $2-5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ の範囲であった。一方、高温下で血中乳酸上昇を報告しているFink et al.²⁾、Yaspellkis et al.²⁰⁾およびYoung et al.²¹⁾の研究では、高温下の血中乳酸は $4-7 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ と血中乳酸に有意差がないとする研究と比較して若干高い傾向である。したがって、高温条件下運動時の乳酸移動の増加は、乳酸の産生と除去の平衡が崩れ $5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度を越えて過剰に蓄積されるような状態で生じる可能性がある。

今回、体重の減少分 (Δkg) は高温下で有意に大きかった。高温条件下の運動時、特に環境温が体温を越えるような場合には発汗が増加し体温調節がおこなわれ、その発汗のための水分は細胞内液から供給される。しかし、運動強度が高い場合、細胞内液の乳酸とクレアチンの増加により細胞内浸透圧の増加をもたらす、水分は細胞外液から活動筋の細胞内へ流入する^{10,15)}。これは、細胞内液からの水分移動を困難にするので、乳酸を細胞内液から細胞外液へすみやかに移動させることが必要となる。従来、乳酸の細胞膜通過については乳酸の分子量が90と小さいため自由拡散とされてきたが、近年の研究からモノカルボン酸輸送担体 (monocarboxylate transporter; MCT) が乳酸の細胞膜通過に関与することが報告されている³⁾。もし高温によってMCT活性が亢進し乳酸の細胞から細胞外への能動的な移動が増加するならば、高温下運動中には常温下に比べ血中

乳酸の上昇が起きるが、この可能性は今後の検討課題であろう。

運動強度が高くなると活動筋では細胞外液から内液へ水分が移動するので、活動筋の水分が汗へ変換される可能性はない。したがって、高温下での高強度運動時には非活動筋や他の組織から細胞外液や血液への水分移動が考えられる。ただし、汗の量は体温の上昇とともに増加するが、血液の乳酸量は高温下で高いために汗の量は体温上昇に比べて少ないであろう。その理由として、体温と汗の量との関係は高張性食塩水輸液により高温側へ移動することが知られているからである¹⁸⁾。したがって、今回の体重変化の実験条件間での差異は負荷中の変化というよりは回復期30分間での変化を含んだものであると思われる。

V. 結論

本研究では、常温下および高温条件下における漸増率20wattの漸増運動負荷テスト中の酸素および血中乳酸動態を比較検討した結果、VTは温度条件間で差が認められず、高温条件下で無氣的代謝の亢進は推論されなかった。しかし、血中乳酸は $5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ 程度から温度条件間で差が生じ、高温条件下で血中乳酸の上昇が観察された。さらに、回復期の血中乳酸ピーク値は高温条件下で早く観察された。これらの結果は、高温条件下運動時には乳酸が筋から血液への移動が早まる可能性を示唆している。

引用文献

- 1) Febbraio M A (2001) Alterations in energy metabolism during exercise and heat stress. *Sports Med* 31: 47-59
- 2) Fink W J, Costill D L and Van Handel P J (1975) Leg muscle metabolism during exercise in the heat and cold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 34: 183-190
- 3) 八田秀雄 (2000) 乳酸輸送担体 MCT の発現と乳酸の代謝との関係. *日本運動生理学雑誌* 7: 45-56
- 4) Howley E T, Bassett D R Jr and Welch H G (1995) Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1292-1301
- 5) Kowalchuk J M and Scheuermann B W (1995) Acid-base balance: origin of plasma $[\text{H}^+]$ during exercise. *Can J Appl Physiol* 20: 341-356

- 6) Marino F E, Mbambo Z, Kortekaas E, Wilson G, Lambert M I, Noakes T D and Dennis S C (2001) Influence of ambient temperature on plasma ammonia and lactate accumulation during prolonged submaximal and self-paced running. *J Appl Physiol* 86: 71-78
- 7) Nadel E R, Bullard R W and Stolwijk J A (1971) Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J Appl Physiol* 31: 80-87.
- 8) Nielsen B, Savard G, Richter E A, Hargreaves M and Saltin B (1990) Muscle blood flow and muscle metabolism during exercise and heat stress. *J Appl Physiol*. 69: 1040-1046
- 9) Ozcelik O, Ward S A and Whipp B J (1999) Effect of altered body CO₂ stores on pulmonary gas exchange dynamics during incremental exercise in humans. *Exp Physiol* 84: 999-1011
- 10) Putman C T, Jones N L and Heigenhauser G J (2003) Effects of short-term training on plasma acid-base balance during incremental exercise in man. *J Physiol*. 550: 585-603
- 11) Rowell L B, Blackmon J R, Martin R H, Mazzarella J A and Bruce R A (1965) Hepatic clearance of indocyanine green in man under thermal and exercise stresses. *J Appl Physiol* 20: 384-394
- 12) Saunders P U, Watt M J, Garnham A P, Spriet L L, Hargreaves M and Febbraio M A (2001) No effect of mild heat stress on the regulation of carbohydrate metabolism at the onset of exercise. *J Appl Physiol* 91: 2282-2288
- 13) Savard G K, Nielsen B, Laszczynska J, Larsen B E and Saltin B (1988) Muscle blood flow is not reduced in humans during moderate exercise and heat stress. *J Appl Physiol*. 64: 649-657
- 14) Scheuermann B W and Kowalchuk J M (1998) Attenuated respiratory compensation during rapidly incremented ramp exercise. *Respir Physiol* 114: 227-238
- 15) Sjøgaard G, Adams R P and Saltin B (1985) Water and ion shifts in skeletal muscle of humans with intense dynamic knee extension. *Am J Physiol*. 248: R190-196
- 16) Smolander J, Kolari P, Korhonen O and Ilmarinen R (1986) Aerobic and anaerobic responses to incremental exercise in thermoneutral and a hot dry environment *Acta Physiol Scand* 128: 15-21
- 17) Smolander J, Kolari P, Korhonen O and Ilmarinen R (1987) Skin blood flow during incremental exercise in a thermoneutral and a hot dry environment. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56: 273-280
- 18) Takamata A, Yoshida T, Nishida N and Morimoto T (2001) Relationship of osmotic inhibition in thermoregulatory responses and sweat sodium concentration in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 280: R623-629
- 19) Williams C G, Bredell G A, Wyndham C H, Strydom N B, Morisson J F, Peter J, Fleming P W and Ward J S (1962) Circulatory and metabolic reactions to work in heat. *J Appl Physiol* 17: 625-638
- 20) Yaspelkis B B III, Scroop G C, Wilmore K M and Ivy J L (1993) Carbohydrate metabolism during exercise in hot and thermoneutral environments. *Int J Sports Med* 14: 13-19
- 21) Young A J, Sawka M N, Levine L, Cadarette B S and Pandolf K B (1985) Skeletal muscle metabolism during exercise is influenced by heat acclimation. *J Appl Physiol* 59: 1929-1935
(平成16年5月14日受付, 平成17年2月17日訂正,
平成17年6月1日受理)