HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高温条件下高強度運動負荷中の血中乳酸と血液浸透圧の関係
Author(s)	千葉, 智則; 石井, 裕明; 高橋, 信二 他
Citation	日本生理人類学会誌, 12(3), 153-159
Issue Date	2007-08-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44193
Rights	日本生理人類学会. 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである.
Type	journal article
File Information	NSJG12-3_153-159.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Japan Society of Physical Anthropology

日本生理人類学会誌
Vol.12, No. 3, 2007年8月

原 著

高温条件下高強度運動負荷中の血中乳酸と血液浸透圧の関係

RELATIONSHIP BETWEEN BLOOD LACTATE AND BLOOD OSMOLARITY DURING HIGH INTENSITY EXERCISE IN HEAT

千葉智則[1)]・石井裕明[2)]・高橋信二[3)]・矢野徳郎[4)]

Tomonori CHIBA, Hiroaki ISHII, Shinji TAKAHASHI and Tokuo YANO

Abstract

The purpose of the present study was to examine the relationship between blood lactate (La) and blood osmolarity (Osm) during high intensity constant load exercise in heat. Seven male subjects (age; 20.7±1.4 yrs, height; 174.1±4.9 cm, body mass; 68.1±4.3 kg, $\dot{V}O_{2max}$; 47.3±5.8 ml·kg^{-1}·min^{-1}) performed a 80%$\dot{V}O_{2max}$ exercise for 10 min by using cycle ergometer on two different conditions: an ambient temperature of 20℃ and 50% relative humidity (control; CON) and 40℃ and 50% relative humidity (heat trial; HT). Trials were conducted within a week in random order. Forearm skin blood flow during exercise were higher in HT compared with CON (P<0.05), however, no difference in oxygen consumption during exercise was observed between HT and CON. These results suggest that blood flow to active muscles during exercise may be unchanged by HT. In spite of the similar oxygen consumption, exercise in HT resulted in a higher La at 3 min during exercise compared with CON (6.0±0.3 mmol·l^{-1} vs 5.0±0.6 mmol·l^{-1}, P<0.05). In contrast, Osm was unchanged in HT during exercise and recovery compared with CON. In addition, the changes in Osm were highly correlated with the changes in total blood electrolytes (Na^+, K^+ and Cl^-) including La^- (r=0.98, P<0.05). It is suggested from these results that the changes in Osm during exercise in HT and CON may be controlled by the change in total blood electrolytes but not only the change in La^-. The reason for elevated La in HT at earlier time during exercise was unknown.

Keywords: *blood lactate, blood osmolarity, high intensity exercise, heat*
血中乳酸，血液浸透圧，高強度運動，暑熱

I. 緒言

高温条件下の運動時には体温調節応答が起こり，皮膚血流量や発汗量が増加する[6)]。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，無気的代謝が亢進するために細胞内では乳酸とクレアチンが増加する。その結果，細胞内浸透圧が増加し，水分は細胞外液から活動筋の細胞内へ流入することが知られている[8),11)]。すなわち，高強度運動時には浸透作用により活動筋の細胞内水分の細胞外液への移動は著しく低下すると考えられる。したがって，発汗をともなうような高温下における高強度運動時には，細胞内の増加した浸透圧を速やかに低下させることが，細胞外液量を保持するために望ましいと考えられる。われわれは漸増運動負荷を用いた実験で，20℃の環境温に比べて40℃ではAT

[1)]東北学院大学教養学部人間科学科 Department of Human Science, Tohoku Gakuin University
[2)]東北学院大学大学院人間情報学研究科博士課程 Doctoral Program in Human Informatics, Tohoku Gakuin University
[3)]東北学院大学教養学部地域構想学科 Department of Regional Management, Tohoku Gakuin University
[4)]北海道大学大学院教育学研究科 Graduate School of Education, Hokkaido University

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physical Anthropology

以上の高強度負荷から血中乳酸が上昇することを報告した[1]。この結果は，常温下に比べ高温下では乳酸の筋から血液への移動が強度依存的に早まる可能性を示唆している。高温下高強度運動時に乳酸の細胞外への速やかな移動が起れば，細胞内浸透圧の低下が促進されるであろう。その結果，細胞外液の浸透圧が増加し，非活動筋や他の組織からの水分移動が促進されると考えられる。しかし，これまでの高温下運動時における血中乳酸に関する多くの研究は，糖質代謝や無気的代謝との関連から検討されてきており[3),5),13),14)]，細胞外液の浸透圧変化との関連性を検討した研究はない。

そこで，本研究では高強度定常運動負荷を用いて，常温下に比べて高温下運動時に血中乳酸が上昇するか否か検討した。さらに，高強度運動時の血中乳酸と血液浸透圧の関係を両条件下で比較検討することを目的とした。

II. 方法

A. 被験者

被験者は，年齢 20.7±1.4 歳の健康な大学生男子 7 名であった。被験者の身体的特性は，身長 174.1±4.9 cm，体重 68.1±4.3 kg，最大酸素摂取量（$\dot{V}O_{2max}$） 47.3±5.8 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ 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。なお，本研究の実施は北海道大学研究科倫理委員会で承認された。

B. 運動負荷テスト

被験者は，$\dot{V}O_{2max}$ 測定のために常温下（20℃，相対湿度 50%）の環境条件下で漸増運動負荷テストを行った。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 60 rpm 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 20 watt の漸増負荷で被験者が疲労困憊に至るまで行った。なお，$\dot{V}O_{2max}$ の判定基準は，i）酸素摂取量（$\dot{V}O_2$）の増加が前負荷段階の 2 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ 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（HRmax = 220 − 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)]。さらに，測定された $\dot{V}O_2$ と負荷の関係から 80%$\dot{V}O_{2max}$ に相当する強度を決定した。

C. 定常運動負荷テスト

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，80% $\dot{V}O_{2max}$ での定常運動負荷テストをそれぞれ別の日に行った。各テストは 1 週間以内の間隔にてランダムに配置された。定常運動負荷は電磁式自転車エルゴメーターを用いて 10 分間実施した。

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に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($\dot{V}E$)，$\dot{V}O_2$ を breath-by-breath で測定し， 20 秒毎に平均出力した。直腸温はサーミスター温度計(K730:TECHNO SEVEN)を用いて測定し，皮膚血流量はレーザー組織血流計（FLO-C1：OMEGA WAVE）を用いて，前腕部の皮膚血流量を安静時から回復期まで連続的に測定を行った。また，安静時，運動時 3，6，9 分，運動終了直後および回復期 3，6，9 分に指先から 25 μl 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）で分析し乳酸を測定した。さらに，安静時，運動時 5 分，運動終了直後および回復期 5，10 分に指先から 80 μl の血液をキャピラリーチューブに採取した。そのうち 10 μl は蒸気圧法オズモメーター（5520：WESCOR）にて全血浸透圧の測定に用いた。残りの 70 μl は Na^+，Cl^-，K^+およびヘマトクリット（Hct）の測定に用いた。これらの分析は，採血後直ちにポータブル血液分析器（300F：i-STAT Corporation）により実施した。この分析器の較正には既知濃度の較正液を用いて電位差法により測定し，Hct は電導度電極法で測定した。

D. 統計処理

すべての値は平均値±標準偏差で示した。定常運動負荷テスト中の運動時（安静から運動開始 9 分）および回復期（運動開始 9 分から回復期 9 分）における直腸温，皮膚血流量，$\dot{V}O_2$，血液浸透圧，血中乳酸，および血中電解質の動態の比較については，温度間要因および経過時間要因を考慮した反復測定の二元配置の分散分析（温度要因 2 水準×時間要因 4 水準）により行った。有意な交互作用あるいは温度間要因の主効果が認められた場合，従属変数ごとに対応のある t 検定を用いて各時間水準で常温下と高温下の比較を行った。統計的第 I 種の過誤の増大を考慮し，対応のある t 検定では Bonferroni の不等式を用いて有意水準の調整を行った。血中電解質変化分の総和と血液浸透圧の関係についてはピアソンの積率相関係数から検討した。すべての検定において統計的有意水準は 5%未満とした。

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physical Anthropology

Table1. Comparison of body mass, $\dot{V}O_2$, %$\dot{V}O_2$max and blood lactate in control (CON) and heat trial (HT).

		CON	HT
Body mass	pre	67.70 ± 4.64	67.30 ± 4.31
(kg)	post	67.45 ± 4.64	66.56 ± 4.33
	Δkg	0.25 ± 0.06	0.74 ± 0.18 *
$\dot{V}O2$	(ml·min^{-1})	2671 ± 432	2657 ± 467
%$\dot{V}O2$max	(%)	82.8 ± 6.1	82.1 ± 6.1
Blood lactate	rest	1.01 ± 0.25	0.91 ± 0.27
(mmol·l^{-1})	peak	9.61 ± 1.51	9.96 ± 1.13

Values are means±SD for 7 subjects. * : P<0.05.

III. 結果

A. 体重，直腸温および皮膚血流

体重の減少分（Δkg）は常温下に比べ高温下では有意に増加した（Table1）。直腸温は運動時および回復期に有意な交互作用が認められ，回復期3，6分および9分では高温下で有意に高値を示した。皮膚血流量は温度間要因に主効果が認められた。さらに，回復期には有意な交互作用が認められ，運動時，回復期ともに高温下で有に高値を示した（Fig. 1）。

B. 酸素摂取量

運動時平均 $\dot{V}O_2$ は常温下と高温下でそれぞれ 2671±432 ml·min^{-1}，2657±467 ml·min^{-1} と有意な差は認められなかった。定常運動負荷時の $\dot{V}O_2$ から算出された実際の運動強度は，常温下，高温下でそれぞれ 82.8±6.1% $\dot{V}O_{2max}$，82.1±6.1% $\dot{V}O_{2max}$ であった（Table1）。$\dot{V}O_2$ は運動時，回復期ともに有意な交互作用は認められなかった(Fig. 2)。

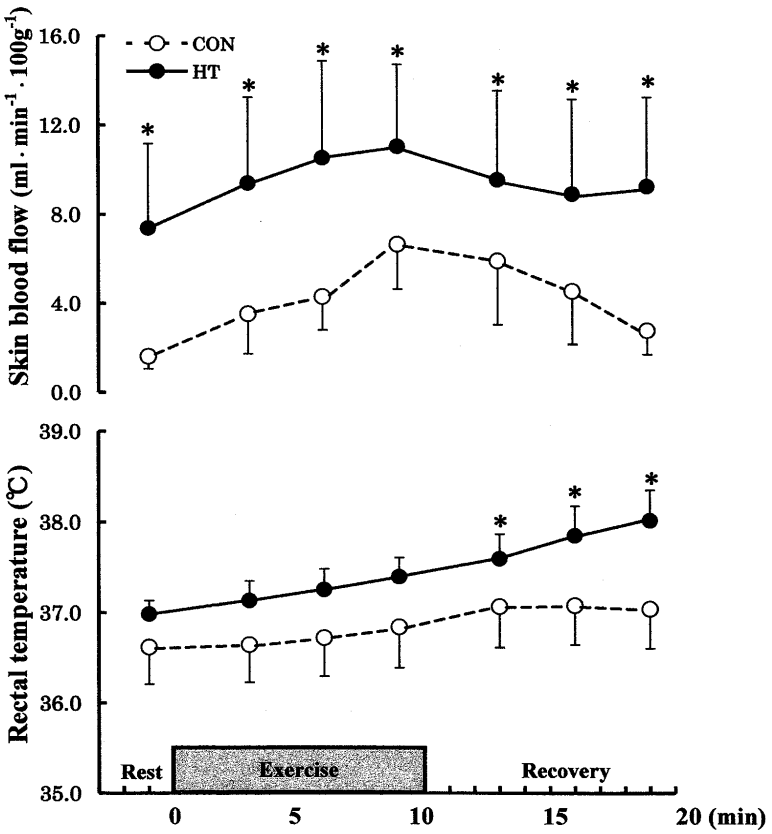

Fig.1. Comparison of rectal temperature and forearm skin blood flow during rest, exercise and recovery in CON and HT. Values are means ± SD for 7 subjects. * : P<0.05.

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physical Anthropology

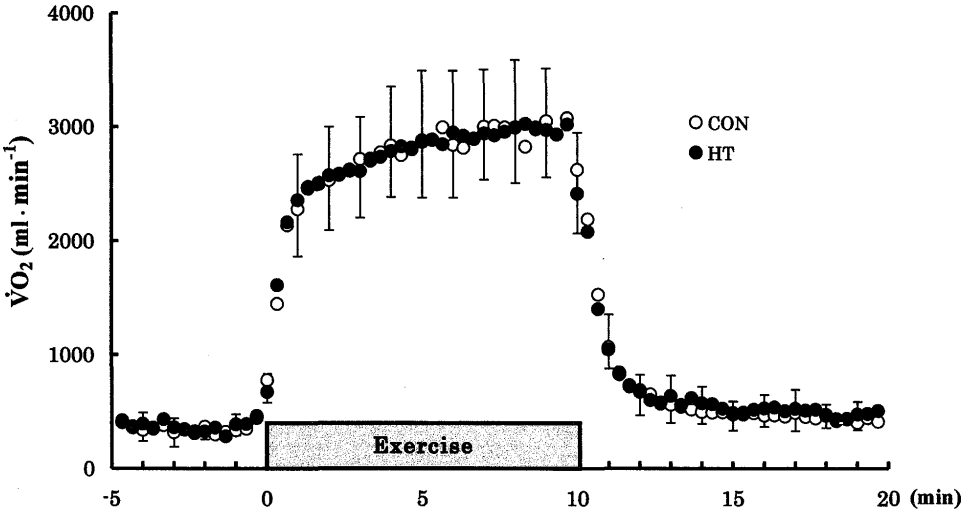

Fig.2. Comparison of oxygen consumption during rest, exercise and recovery in CON and HT. Values are means ± SD for 7 subjects.

C. 血中乳酸および血液浸透圧

Fig. 3 に運動時および回復期の血中乳酸および血液浸透圧の動態を示した。安静時から運動時の血中乳酸には有意な交互作用が認められ，運動時 3 分では常温下に比べて高温下で有意に高かった。しかし，運動時 6，9 分目には有意な差は認められなかった。血中乳酸ピーク値は，常温下で 2 名が回復期に得られた以外はすべて運動時 9 分に得られた。血中乳酸ピーク値は常温下 9.61±1.51 mmol·l^{-1}，高温下 9.96±1.13 mmol·l^{-1} (Table1) と有意な差は認められなかった。また，回復期の血中乳酸にも有意な交互作用は認められなかった。運動時および回復期の血液浸透圧は両条件ともに運動時 5 分でピークを示し，その動態には有意な交互作用および温度間要因の主効果は認められなかった。

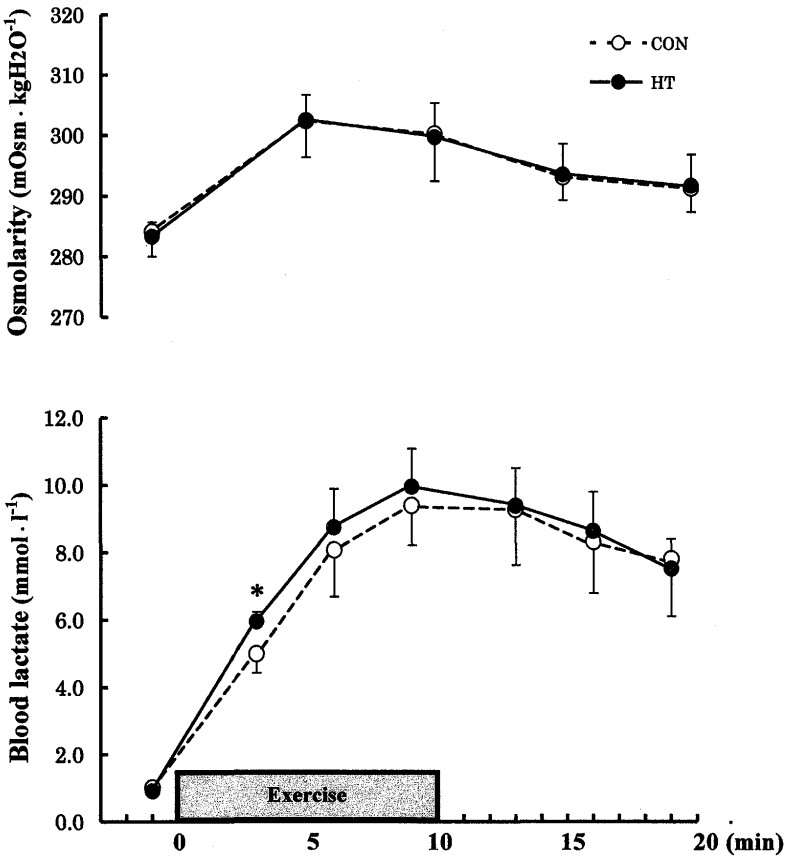

Fig.3. Comparison of blood osmolarity and blood lactate during rest, exercise and recovery in CON and HT. Values are means ± SD for 7 subjects. ＊：P<0.05.

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physical Anthropology

Table 2. Comparison of blood electrolytes during rest, exercise and recovery in CON and HT.

		rest	ex5	ex10	rec5	rec10
Na^+	CON	140.6 ± 1.5	144.4 ± 0.8	143.5 ± 2.1	139.8 ± 1.5	139.5 ± 0.8
	HT	140.7 ± 1.4	143.3 ± 1.9	142.6 ± 1.8	140.3 ± 1.5	140.1 ± 1.8
K^+	CON	4.3 ± 0.2	5.6 ± 0.2	5.1 ± 0.4	4.3 ± 0.2	4.4 ± 0.2
	HT	4.1 ± 0.2	5.6 ± 0.4	5.3 ± 0.2	4.2 ± 0.2	4.4 ± 0.3
Cl^-	CON	105.5 ± 1.0	110.7 ± 1.4	108.3 ± 2.1	105.0 ± 1.3	105.2 ± 1.0
	HT	106.7 ± 1.4	112.3 ± 1.5	111.2 ± 1.0 *	108.2 ± 1.3 *	108.5 ± 1.2 *

Values are means ± SD for 7 subjects. * : $P<0.05$. unit: $mEq \cdot l^{-1}$

D. 血中電解質およびヘマトクリット

常温下および高温下における血中 Na^+, K^+および Cl^- は運動時5分で両条件ともに最大の増加を示し，いずれも回復期に向け減少傾向を示した。血中 Cl^- は運動時，回復期に有意な交互作用が認められ，運動時10分および回復期で常温下に比べ高温下で有意に高かった。しかし，Na^+および K^+には有意な交互作用および温度間要因の主効果は認められなかった。

Fig4に今回測定した Na^+, K^+, Cl^-および乳酸も含めた血中電解質の安静時からの変化分の総和（$\Delta mEq \cdot l^{-1}$）と血液浸透圧の安静時からの変化分（$\Delta mOsm \cdot kgH_2O^{-1}$）の関係を示した。なお，血中電解質変化分の総和の算出においては，乳酸は運動時6，9分，回復期6，9分の値を用いた。その結果，血中電解質変化分の総和と血液浸透圧の変化分には r=0.98 の有意な正の相関関係が認められた。

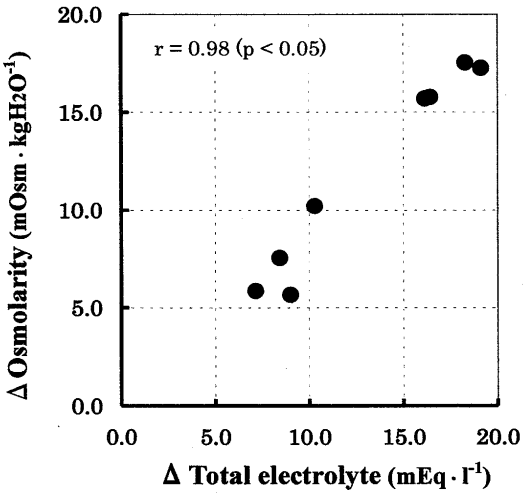

Fig.4. Relationship between Δtotal electrolyte and Δosmolarity during exercise and recovery in CON and HT. Values are means for 7 subjects.

常温下および高温下における安静時の Hct には差がみられず（48.1±2.3% vs 47.7±1.8%），両条件ともに運動終了時に最も上昇した（54.6±2.3% vs 54.7±2.4%）。Hct はその後の回復期には両条件ともに徐々に低下したが，有意な交互作用および温度間要因の主効果は認められなかった。

IV. 考察

本実験の結果，高温下では常温下に比べ安静，運動および回復期で皮膚血流量と直腸温が有意に上昇し，温熱ストレス時の生理的応答が観察された。一方，$\dot{V}O_2$は安静，運動および回復期を通して両条件下で差がみられなかったが，血中乳酸は高温下の運動開始3分目に有意な上昇を示した。

従来，高温下運動時に報告されてきた血中乳酸の上昇の原因の一つは，体温調節のための皮膚血流量増加にともない，活動筋の血流量が減少して筋の低酸素状態が生じるためと考えられてきた [3),12)]。しかし，Neilsen et al. [7)]や Savard et al. [10)] は，ヒトに対して熱希釈法を用いて高温下運動時の血流量を推定した結果，活動筋での血流量の減少は認められないことを報告している。本実験結果においても，高温下では，従来の報告同様に皮膚血流量は増加していたが，$\dot{V}O_2$は常温下と変化せず，運動初期の酸素供給の遅れ（酸素借）も変化がなかった。すなわち，高温下での運動時に活動筋への血流不足があったとは考えにくい。

高温下運動時の血中乳酸上昇の他の原因として，筋グリコーゲン利用の増加とする報告は多い [2)]。しかし，Saunders et al. [9)]は，被験者に20℃および40℃の環境にて70%$\dot{V}O_{2max}$，5分間の運動を行わせた結果，運動1，5分後の筋グリコーゲン濃度および筋乳酸濃度には温度条件に差がみられず，短時間の高温下運動では無気的代謝が亢進しないことを報告している。今回用いた運動強度は彼らの用いた強度よりもやや高かったので直接は比較できない。しかし，彼らは糖代謝の律速酵素であるグリコーゲンフォスフォリラーゼとピルビン酸脱水素酵素活性は両条件下で運動開始1分にはすでに十分に活性化し，両条件間に差がみられないことを指摘している。以上の

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physical Anthropology

ことから推測すると，今回の高温条件下での運動初期に糖代謝が亢進した可能性は低いだろう。さらに，血中乳酸ピーク値には温度条件間で有意な差がみられず，回復期の血中乳酸動態にも差がなかった結果から推測すると，高温条件下で乳酸の除去が遅延している可能性も低い。すなわち，今回観察された高温下高強度定常運動負荷初期の血中乳酸上昇は，筋の代謝性の変化による乳酸生成増加や除去率低下が原因ではなく，乳酸の移動（拡散）が亢進している可能性が示唆された。

一方，血液浸透圧は安静時，運動時および回復期ともに温度条件間で差が認められなかった。高温環境下では皮膚血流の増加に伴う放熱効率が低下するので，発汗による熱放散が重要となる。その発汗のための水分は細胞内液から供給されることが知られている。そこで，本研究では，高温下高強度運動時には活動筋から乳酸が早く移動し，その結果，血液浸透圧が上昇すれば水分移動にとって有効であると仮説を立てた。しかし，実際には血液浸透圧は温度条件間で変化しなかったので，本仮説は棄却される。

今回，血液浸透圧と血中乳酸の動態は運動時回復期ともに両条件で概ね同様の傾向であった。しかし，運動時の血液浸透圧が5分でピークとなるのに対し，血中乳酸のピークは9分であり，乳酸が単独で血液浸透圧に影響を及ぼしているわけではないことは明らかであった。安静時からの血液浸透圧の変化量は，乳酸イオン（La^-）を含めた血中K^+，Na^+，Cl^-の変化量の総和との間に極めて高い有意な相関関係が認められた。これらの結果は，温度条件にかかわらず，血液浸透圧はLa^-も含めた血液電解質濃度の変化量の総和によって決定されること，さらに，高温下では血液浸透圧が常温下に比べ上昇しないように電解質が増減して補完し合っている事を示唆している。なぜなら，Cl^-は高温下運動10分および回復期で有意に上昇しているにもかかわらず，血液浸透圧には温度間に変化が認められなかったからである。おそらく，高温下にはCl^-の増加分，今回測定していない電解質が減少していたと考えられる。電解質の変化量の総和が血液浸透圧の変化量に影響を及ぼしていることからすると，高温下運動3分目に観察されたLa^-の増加分の約1.0 $mEq \cdot l^{-1}$についても，他の電解質が減少している可能性が高い。

高温下では常温下に比べ2倍の発汗量であったが，Hctは温度条件間には差が認められなかったことから，高温条件下では細胞内液から生体外への水分移動は多かったと考えられる。このことは非活動筋あるいは他の組織の水分が血漿水分量を維持するように多く移動する可能性を示唆している。細胞内外での水分の移動は浸透圧変化が駆動力となる。しかし，高温下の血液浸透圧は常温下に比べ上昇していなかった。すなわち，今回の高温下運動時の水分移動の増加は血液浸透圧に関係しているとは考えられない。高温下高強度運動時に血液への水分移動が増加する原因については，高温下では末梢血管が拡張するので，毛細管における有効濾過圧が低下することにより，常温下に比べ非活動筋や他の組織からの水分が流入しやすくなる可能性も考えられるが，今回の研究からは明らかにならなかった。

V. 結論

高温下での高強度定常運動時3分目には血中乳酸は常温下よりも有意に上昇し，高温下高強度運動時には乳酸の活動筋から血液への移動が促進されていることが示唆された。この血中乳酸の増加は血液浸透圧を増加させるために起きているということが本研究の仮説であった。しかし，血中乳酸増の血液浸透圧への影響は血中電解質の変動によって相殺されていたので，高温条件で血液浸透圧は増加しなかったと考えられた。したがって，本研究の仮説は棄却された。高温条件下において乳酸の移動が促進される直接的な原因は今後の検討課題である。

《引用文献》

1) 千葉智則，石井裕明，矢野徳郎：高温条件下漸増運動負荷中の血中乳酸動態，日本運動生理学雑誌，13：1-8，2006

2) Febbraio M A: Alterations in energy metabolism during exercise and heat stress, Sports Med. 31: 47-59, 2001

3) Fink W J, Costill D L and Van Handel P J: Leg muscle metabolism during exercise in the heat and cold, Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 34: 183-190, 1975

4) Howley E T, Bassett D R Jr and Welch H G: Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary, Med Sci Sports Exerc. 27:1292-1301, 1995

5) Irondelle M, Freund H: Carbohydrate and fat metabolism of unacclimatized men during and after submaximal exercise in cool and hot environments, Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 37:27-38, 1977

6) Nadel E R, Bullard R W and Stolwijk J A: Importance of skin temperature in the regulation of sweating, J Appl Physiol. 31:80-87, 1971

7) Nielsen B, Savard G, Richter E A, Hargreaves M and Saltin B: Muscle blood flow and muscle metabolism during exercise and heat stress, J Appl Physiol. 69:1040-1046, 1990

8) Putman C T, Jones N L and Heigenhauser G J: Effects

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Physical Anthropology

of short-term training on plasma acid-base balance during incremental exercise in man, J Physiol. 550:585-603, 2003

9) Saunders P U, Watt M J, Garnham A P, Spriet L L, Hargreaves M and Febbraio M A: No effect of mild heat stress on the regulation of carbohydrate metabolism at the onset of exercise, J Appl Physiol. 91: 2282-2288, 2001

10) Savard G K, Nielsen B, Laszczynska J, Larsen B E and Saltin B: Muscle blood flow is not reduced in humans during moderate exercise and heat stress, J Appl Physiol. 64:649-657, 1988

11) Sjøgaard G, Adams R P and Saltin B: Water and ion shifts in skeletal muscle of humans with intense dynamic knee extension, Am J Physiol. 248: R190-196, 1985

12) Williams C G, Bredell G A, Wyndham C H, Strydom N B, Morisson J F, Peter J, Fleming P W and Ward J S: Circulatory and metabolic reactions to work in heat, J Appl Physiol. 17:625-638, 1962

13) Yaspelkis B B III, Scroop G C, Wilmore K M and Ivy J L: Carbohydrate metabolism during exercise in hot and thermoneutral environments, Int J Sports Med. 14:13-19, 1993

14) Young A J, Sawka M N, Levine L, Cadarette B S and Pandolf K B: Skeletal muscle metabolism during exercise is influenced by heat acclimation, J Appl Physiol. 59:1929-1935, 1985

《連絡先》
千葉智則
〒981-3193 仙台市泉区天神沢 2-1-1
東北学院大学教養学部人間科学科
Tel　022-773-3392
e-mail chiba@izcc.tohoku-gakuin.ac.jp

(2006年7月20日受付, 2007年5月29日採用決定, 討論受付期限2008年8月末日)

NII-Electronic Library Service