

水分補給による持久性運動パフォーマンスの修飾  
—特に水分量・グルコース・電解質の相互関係—

小坂光男\* 山根 基\*\* 松本 実\*\* 加藤貴英\*\*  
塚中敦子\*\*\* 大西範和\*\*\*\* 松井信夫\*\*\*\*

Effect of Fluid Ingestion on Performance of Prolonged Exercise  
— Interaction of Beverage, Glucose and Electrolyte —

Mitsuo KOSAKA, Motoi YAMANE, Minoru MATSUMOTO, Takahide KATO  
Atsuko TSUKANAKA, Norikazu OHNISHI, and Nobuo MATSUI

Abstract

Considerable interest is attracted to the problems on water ingestion during exercise, however, it is still hypothesis that water ingestion would attenuate the exercise-induced increase in thermoregulatory mechanism such as rectal and muscle temperatures and plasma epinephrine, thereby resulting in less net muscle glycogen utilization. In the present review article, therefore, the hypothesis was discussed and confirmed by the results of 25 important papers related to the problems of improvement of physical performance based on the following three papers: (1) Effects of fluid ingestion during intermittent high intensity swimming exercise on thermoregulatory response and performance. (2) Effect of fluid ingestion on muscle metabolism during prolonged exercise. (3) Heat stress increases muscle glycogen use but reduces the oxidation of ingested carbohydrates during exercise. These review articles indicate that fluid ingestions reduces muscle glycogen use during prolonged exercise, which may account in part, for the improved performance in the hypothesis mentioned above.

〈はじめに〉

人体において体液の組成や生理学的機能が生命の維持に果たす役割は極めて大きく、特に人の体組織の60%以上を占める水の出納は体温調節に代表される、代謝・体温発汗や運動生理学の基本的研究テーマである<sup>(1)(2)(3)</sup>。

種々の生体反応の変化を指標として、水分補給(特に水分補給量、含有グルコース・電解質濃度の相互関係に注目)が、運動パフォーマンスや筋グリコーゲン利用への修飾や生体反応量の増加減少に果たす役割について解説する。

本稿においては、持久性運動中に展開される

---

\*教授, \*\*大学院生, \*\*\*研究生, \*\*\*\*非常勤講師

## I 運動エネルギー源と代謝

### ①エネルギー代謝—有酸素・無酸素的解糖—について

筋収縮の化学的变化は、以下のような経路をとるが、原動力としてのエネルギー源は、蛋白質、脂質および糖質の分解である。とくに筋のエネルギー源としては後2者に依存している。図1に示す如く、解糖過程においてグリコーゲンやブドウ糖からピルビン酸まで代謝される間は無酸素的に行われる。Cr-Pの分解によって生じたPi（無機リン）はグリコーゲンの解糖を促進しこの間に3分子のATPが生産される。有酸素的解糖過程では、TCA回路に入ったピルビン酸が水と炭酸ガスに分解されるまで、ブドウ糖1分子から計算すると計39分子のATPを生ずる。有酸素的な状態では無酸素の場合に比べ約19倍の効率をもつことになる。これらのATPは収縮時のエネルギーとして利用され、酵素が供合されない場合は乳酸として蓄積されるが、これは再度グリコーゲンに合成される。同じように脂質はグリセリンと脂肪酸に分解され、アセチルCo-Aを介してTCA回路に入り、ATPを生産することになる<sup>(4)</sup>。

### ②筋の疲労—筋収縮運動と乳酸の生成—について

筋収縮を繰り返すと、次第にその収縮高が増大し（階段現象）、その後低くなってくる。単一収縮を長い間続けているとついには、収縮す

ることができなくなる。このような現象が疲労である。この原因は筋鞘の興奮性の低下、活動電位から化学反応に至る能率の低下、化学反応から機械反応に至る能率の低下、エネルギー源の消費、乳酸生成に伴うpHの減少などが考えられる。

乳酸は安静時でも約0.015%含まれているが、極度に疲労したときは0.3%にも上昇する。また、死後硬直を起こした筋肉では0.5%以上も含まれている。疲労した筋肉でも、血液循環が円滑に行われ酸素が十分に補給されれば蓄積した乳酸が分解され、再び収縮能力を持つようになる<sup>(4)</sup>。以上の如く、筋収縮による（エネルギー代謝）の過程を学習すれば、有酸素・無酸素条件下で筋グリコーゲンの分解による熱発生と仕事エネルギーへの転換が筋運動の原動力であることが容易に理解できる<sup>(4)</sup>。

## II 水分補給と水環境下の運動パフォーマンス<sup>(5)</sup>

高強度の運動では代謝亢進による熱生産増加で高体温が引き起こされ、多量の発汗により体重減少や循環機能が低下し運動能力の低下が誘起される。脱水や運動能力の低下を防ぐためには水分摂取により体液を維持することが重要である。水中運動時における水補給が生体機能や水泳時のパフォーマンスに及ぼす影響を検索した論文は比較的少なく、本稿では最近の4つの論文について簡単に抄録し、代表論文としては、田井村ら<sup>(5)</sup>の研究を詳しく紹介する。

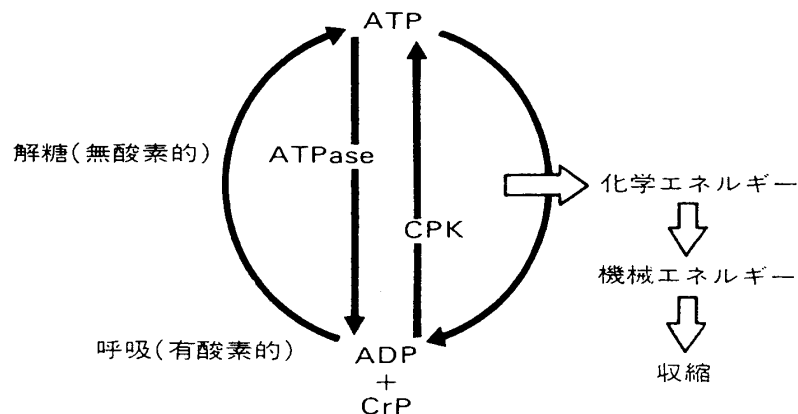


図1. 筋収縮エネルギー代謝過程 (4)

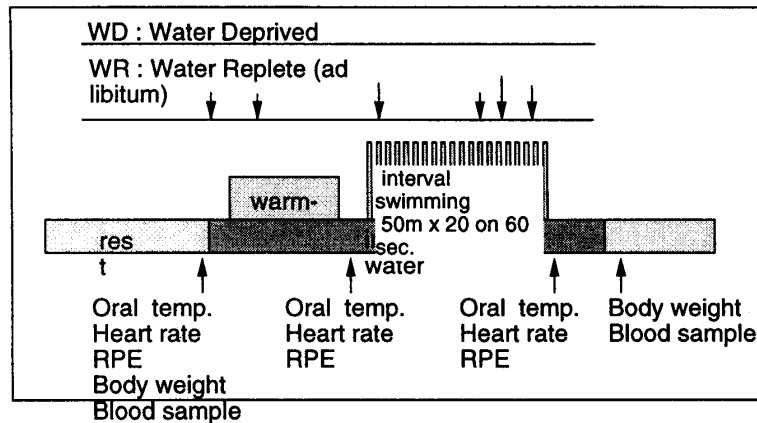


Fig. Experimental protocol (CS I)

図2. 泳走実験プロトコル (5)

Gao et al. は100ヤード (91.4m) のインターバル泳中に重炭酸ナトリウム ( $\text{NaHCO}_3$ ) や塩化ナトリウム ( $\text{NaCl}$ ) 溶液の補給が血中の pH や乳酸、Standard  $\text{NaHCO}_3$  (SBC)、Base Excess (BE) に及ぼす影響について検索<sup>(6)</sup>し、水泳開始前の  $\text{NaHCO}_3$  溶液の補給が水素イオンの流出 (Flux) 促進を介して運動パフォーマンスの向上に効果的であると報告している<sup>(6)</sup>。

Cade et al. は高強度水泳トレーニングの結果生じる筋破損をクレアチンキナーゼ (CK) や乳酸脱水素酵素 (LDH) を指標として研究し、水分補給や栄養素摂取の調整が大きく影響する事を検索<sup>(7)</sup>した。

Maresh et al. は200ヤード (183m) 泳2回のタイムトライアル中の水分補給量を変化させて、血漿浸透圧 (Plasma osmolality) や体重 (Body weight)、血漿量 (Plasma volume)、血漿乳酸 (Plasma lactate) 等を指標として水泳の前後で比較し、適切なる水分補給量が運動パフォーマンスの向上に肝要と説いている<sup>(8)</sup>。

田井村ら<sup>(5)</sup>は、水泳中の飲水が体温調節機能、循環機能及び水泳パフォーマンス (水泳タイム) に及ぼす影響を検討している<sup>(5)</sup>。被験者は実験協力の承諾が得られた大学男子水泳選手で、図2に示すプロトコルの如く、実験1では、平均水温  $29.95 \pm 0.05^\circ\text{C}$  の条件で50m インターバル泳を行わせ、測定は水泳パフォーマンスの指標となる50m インターバル泳のタイム、体温 (口腔温)、心拍数、RPE (主観的運動強度)、体重

及び血液分析 (血中乳酸、血漿量、血漿浸透圧)。各被験者には自由飲水と非飲水の二通りの条件で、3日間の間隔を置き、同時刻の2日間にわたり、計2回のインターバル泳を行っている。実験2では、水泳速度と体温変化量、発汗量の関連を検討するために平均水温  $30.4 \pm 0.20^\circ\text{C}$  の条件で最大下速度での1500m泳を行わせ、実験1と同様のプロトコルで水泳前後の体温、心拍数、体重を測定し以下の結果を得ている。a) 水泳前後の心拍数、体温変化は自由飲水時、非飲水時とも有意に上昇。体温変化量は自由飲水時に小さかったが、両条件間に有意な差はない。b) 体重減少量と飲水量から求めた発汗量は、自由飲水時がわずかに多かったが両条件とも同

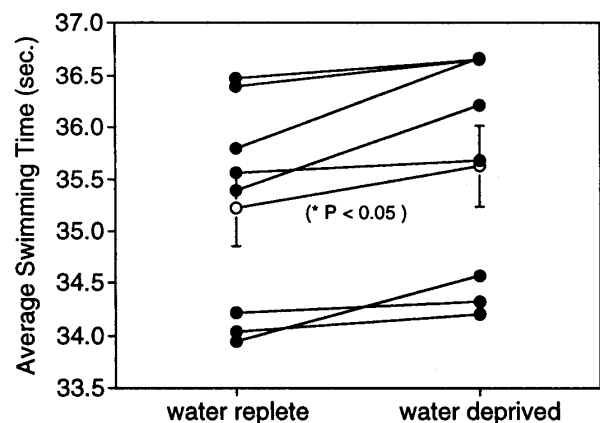


Fig. Effect of water intake or deprivation on the average swimming time in subjects that performed 20 sessions of intermittent 50 m swims with a 1 min interval between each session. Open circles are mean  $\pm$  SEM. (5)

図3. 水分補給・非補給による泳速の比較 (5)

程度で、c) 自由飲水時における飲水率は $26.7 \pm 4.08\%$ 。d) インターバル泳の平均タイムは自由飲水時が有意に速く (図3)、RPEは自由飲水時が有意に低い (図4)。e) 両条件とも水泳前後に血漿量が減少し、血漿浸透圧が上昇したがその変化の程度には有意な差はない。f) 図5に示す如く、実験2において水泳速度と発汗量との間に有意な関連があり、泳速度の上昇に伴い発汗量が上昇する。これらの結果は、長時間

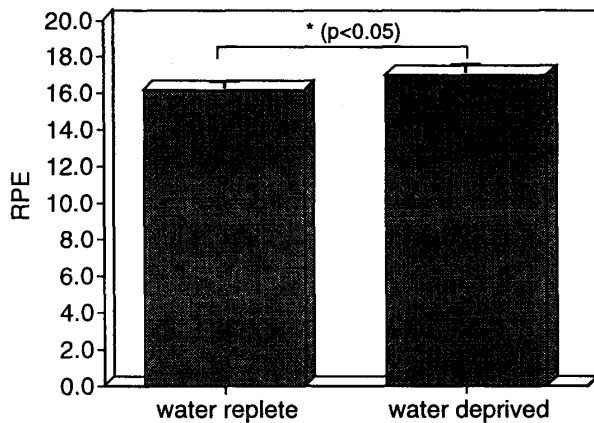


Fig. Effect of water intake or deprivation on RPE in subjects that performed 20 sessions of intermittent 50 m swims with a 1 min interval between each session. Values are means  $\pm$  SEM. (5)

図4. 水分補給・非補給による主観的運動強度の比較 (5)

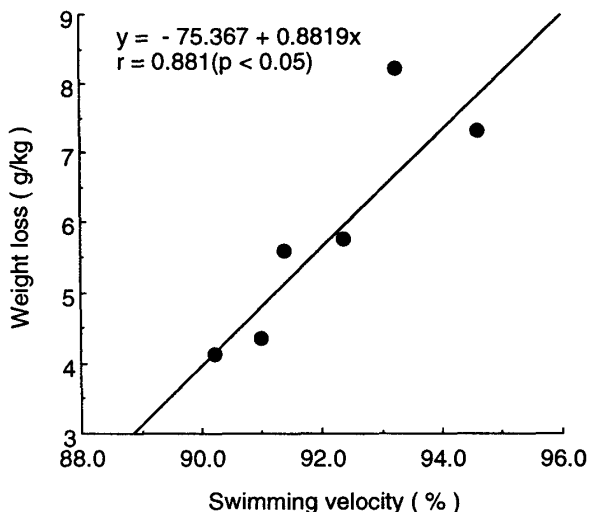


Fig. The correlation between swimming velocity and sweat loss in subjects that performed at submaximal velocity for a 1500m free style swimming. (5)

図5. 水泳速度と発汗 (体重減) の関係 (5)

の陸上運動での報告において、発汗量は飲水量や飲水の成分に影響されないこと、また、酸素摂取能力の高い被験者においては発汗量が少ないとの報告と異なる。田井村らの研究で、水温約 $30^{\circ}\text{C}$ での高強度運動においても、発汗量などの体温調節機能諸値に統計的に有意な差異がなかった理由として、田井村らは、被験者が十分にトレーニングを積んだ選手であり、またインターバル泳における実際の水泳時間が12分程であったことで、その運動量が体温調節機能に影響を及ぼす閾値以下であったものと推測している。1500m泳時の水泳速度と発汗量との間に有意な関連があり、泳速度の上昇に伴い発汗量が上昇することは、水泳の時間や強度の増加に伴い体温調節機能に影響が及ぶと考えてよい<sup>(5)</sup>。

### Ⅲ 水分補給自体が筋運動に及ぼす影響について

最近では水分補給の基質には各種ベバレッジ (Beverage: Be) が用いられ、例えば、クリスタルガイザー (Crystal Gayser: 大塚ベバレッジ株) は100ml当りの栄養成分はNa 1.13mg, Ca 0.46mg, Mg 0.54mg, カリウム 0.18mgでエネルギーとしてのタンパク質、脂質、糖質の含有は0である。このようなBeは運動時水分補給の実験の基本的基質と考えられる<sup>(9)</sup>。以下の研究論文中に記載の如く、多くは水分に各種栄養基質や電解質を含有している。即ち、Wemple et al. は60%蔗糖 (Sucrose) 溶液にNaを25-50mmolが含有するBEを基本とし、運動強度とBe補給量と給水のタイミングを調整することによってヒトの体重減少や体液バランスを検索し報告<sup>(10)</sup>している。

McConell et al. は $21^{\circ}\text{C}$ 環境下で持久性運動中に調整済みBEを補給し、HR、直腸温、血漿電解質、バソプレッシン (ADH) の変化から運動パフォーマンスを検索報告<sup>(11)</sup>、Mudambo et al. は暑熱下での兵士の行軍歩行運動中に上記調整済みBEを補給し、脱水・再給水における生理機能変化を各種指標 (Plasma sodium, Plasma volume, Blood glucose, Plasma osmolality など) から検討し、水分補給がストレスを軽減し、特に

疲労の緩和には Glucose と electrolyte の適量補充が肝要と説明<sup>12)</sup>している。Mack は暑熱環境下での運動後の体力回復に水分補給が効果的だが、口渇の求心性シグナル (afferent signal) は水分中の塩類に起因する味覚性インパルスによって修飾されると報告<sup>13)</sup>、Nassis et al. は CHO と電解質を含む Be が耐久性かつ間歇的強度走行の持久性能力の影響について、運動生理学的研究手法を駆使して検討し、6.9% CHO と等張性電解質溶液補給では運動パフォーマンスの向上と疲労発生時間の遅延は著明ではなかったと報告<sup>14)</sup>、Galloway は暑熱下における運動負荷時の脱水・再給水の対策について大量発汗の抑制を戦略課題と考え、水分補給は水分喪失量と適合するべく、水 + CHO + electrolytic の大量補給が最良の処方箋であると結論<sup>15)</sup>している。

Kay et al. は運動パフォーマンス、体温調節、代謝及び疲労発生に関連して、水分補給は体の体熱保有能を増加し、結果として暑熱下の運動パフォーマンスを向上促進すると提唱、この体熱保有能の増加は体温調節、代謝、脈管系機能変化を誘起し、運動パフォーマンス向上に働くと解説している<sup>16)</sup>。

Rehrer は 3 時間以上の超持久性運動において 30–50mmol/l の Na 含有 Be に CHO を添加する事で持久性増加が期待できると Review<sup>17)</sup>している。

Candas et al. は 36℃ と 10℃ の環境温下で 3 時間 70W 持久性運動負荷中の体温上昇、HR 上昇、血漿高浸透圧、血液の Hypovolemia に対して 0.5 リットルの等張性電解質、蔗糖溶液補給を実施し、脱水時の体温上昇は運動初期の低水分補給量に問題があると提唱<sup>18)</sup>している。

Cian et al. は暑熱下及び運動時の脱水症に CHO と電解質 (electrolyte) 溶液を補給してヒト脳の認知機能を解析、長期記憶の再生には余り効果が認められなかったと報告<sup>19)</sup>している。以上最近の研究報告を簡単に抄録したが、Be の中で栄養基質の含まれない純水のみ補給に関する報告は稀で、以下その代表例とし、Hargreaves et al. の水分補給自体が筋代謝、生体機能に及ぼす影響についての研究結果を比較的詳しく紹介する<sup>20)</sup>。

今日まで、水分補給自体が筋代謝に及ぼす効果について詳細な data が不足している。従って、本研究では一水分補給が運動中の体温、筋

表 1. 持久性運動中の水分補給による生体反応の修飾 (20)

Table, *Physiological responses to 120 min of exercise at 67% peak O<sub>2</sub> uptake with and without fluid ingestion*

	NF	FR
Preexercise Hb, g/dl	14.8±0.3	14.7±0.6
Preexercise body mass, kg	72.7±3.4	72.4±3.6
Δ Body mass, kg	-2.1±0.2	0.2±0.1 †
%Loss	2.9±0.2	+0.2±0.1 †
Δ Blood volume, %	-16.9±2.5	-10.3±2.1 *
Δ Plasma volume, %	-24.3±3.1	-13.7±2.8 *
Oxygen uptake, l/min	3.00±0.03	3.02±0.07
RER	0.92±0.02	0.90±0.02
Heart rate, beats/min	155±4	144±3 †
Rectal temperature, °C		
Before	36.7±0.1	36.7±0.2
120 min	38.6±0.2	38.0±0.2 †
Muscle temperature, °C		
Before	34.2±0.1	33.9±0.4
120 min	39.1±0.5	38.5±0.4 *

Values are means ± SE; n = 5 men. NF, without fluid ingestion; FR, with fluid ingestion; Hb, hemoglobin; Δ, change in; RER, respiratory exchange ratio. O<sub>2</sub> uptake, RER, and heart rate are averages of 4 measurements obtained at 30-min intervals during exercise. Significantly different from NF: \*P < 0.05; † P = 0.01. (20)

表 2. 持久性運動中の水補給による筋代謝の修飾 (20)

Table, Muscle metabolites before and after 120 min of exercise at 67% peak O<sub>2</sub> uptake with and without fluid ingestion

	NF	FR
ATP		
Before	26.0±1.4	26.6±0.9
After	26.3±1.0	27.2±0.8
Creatine phosphate		
Before	81.0±3.5	78.1±4.4
After	56.6±1.9	61.2±2.9
Creatine		
Before	46.0±2.0	48.6±5.8
After	70.0±4.6	65.4±5.0
Lactate		
Before	5.1±0.7	5.2±0.4
After	6.9±0.2	4.9±0.4 *
Glycogen		
Before	587±34	615±24
After	207±51	297±44 *

Values are means ± SE in mmol/kg dry muscle; n = 5 men.

\*Significantly different from NF, P &lt; 0.05. (20)

温、Plasma カテコールアミン etc の上昇を抑制し、結果として筋 Glycogen の実質的な利用が減少する一との仮説を検証するために、下記の如く実験方法を駆使している。即ち、

a) 被験者：運動鍛錬男性 5 名・FR 群・給水 (+)、NF 群・給水 (-) b) 実験プロトコル：20～22℃の通風良好実験室使用・運動負荷：67% peak VO<sub>2</sub>uptake120min - 自転車エルゴメータ・水分補給：～33ml/kg蒸留・脱イオン水 (8 等分して給水)・運動開始後15分毎、8 回給水・実験サンプル採取・指標：運動前 (安静時) 及び運動開始30、60、120分毎採取・採血：Hb, Hct, Plasma Glucose・Lactate・Ep・Nor-Ep・呼気ガス分析：ダグラスバック法、RER (呼吸商) 30秒毎・一般生理機能：HR、直腸温、筋温 - 電気 monitor・筋生検：液体窒素 (凍結乾燥) 筋 Glycogen・Lactate、筋 ATP、Creatine phosphate (CrP)、Creatine c) データ処理：mean ± SE、t-test 他を実施している。結果としては、安静時 (実験前) 及び67% peak VO<sub>2</sub>uptake (120min) 運動負荷中の生理機能 (表 1) 及び筋代謝 (表 2) を NF、FR 両群で比較してある。

・Oxygen uptake : (NS)・HR : NF > FR p < 0.01・RER : NF > FR60, 120min

p < 0.05・直腸温 : NF > FR120min p < 0.01・筋温 : NF > FR120min p < 0.05

・Plasma glucose : (NS)・Plasma lactate : NF > FR30, 120min p < 0.05 (図 6 参照)

・Plasma Ep : (NS)・Plasma nor-Ep : NF > FR120min p = 0.05・Muscle ATP, CrP, Creatine : (NS)・Muscle lactate, Glucose : (NS) at resting・Muscle lactate : NF < FR120min p < 0.05・Muscle Glucose : NF > FR120min p < 0.05・Net muscle Glycogen use : 16% lower in FR (318nmol/kg) VS. NF (380nmol/kg) p < 0.05 (図 7 参照) 以上の結果から Hargreaves et al. は、運動中の給水は Plasma Ep 上昇を抑制し、net muscle glycogen use の減少に関係する事を認めている。従って、給水によって運動中の sympathoadrenal activity が抑制され、体温や体液調節に影響が及ぶ事も考えられる。今回の研究から水分補給が HR, Plasma lactate, Plasma nor-Ep の低下や体温・筋温低下が net muscle glycogen use の低下を誘発し、これと平行して心脈管機能や体温調節機能も運動 Performance の改善に参画すると考えられてる。

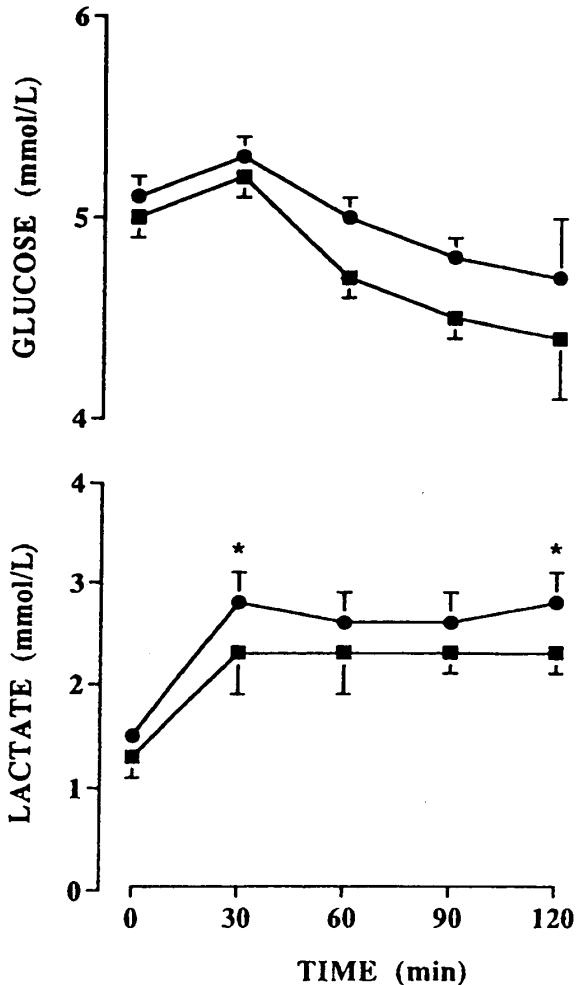


Fig. Plasma glucose and lactate levels before and during 120 min of exercise at 67% peak  $O_2$  uptake with (FR; ■) and without fluid ingestion (NF; ●). Values are means  $\pm$  SE;  $n = 5$  men. \*Significantly different from NF,  $P < 0.05$ . (20)

図6. 水分補給・非補給による運動運動前・中のグルコース・乳酸の血中濃度の比較 (20)

#### IV 高温環境下の運動中の含水炭素 (CHO) の補給が筋 Glycogen 利用に及ぼす影響

本稿の (I) で運動エネルギー代謝について記載したが、(IV) では高温環境下の持久性運動時の筋グリコーゲン利用率に外部から補給した含水炭素 (CHO) 摂取による筋代謝への修飾を報告した研究は少なく、茲では最近発表された5つの論文を簡単に紹介する。Noakes et al. は通常のマラソンやウルトラマラソン (56km) 中の CHO 補給が筋グリコーゲン利用を減少する事に関して、2% Glucose、8% Glucose polymer、8% Fructose の補給量と補給間隔が適切

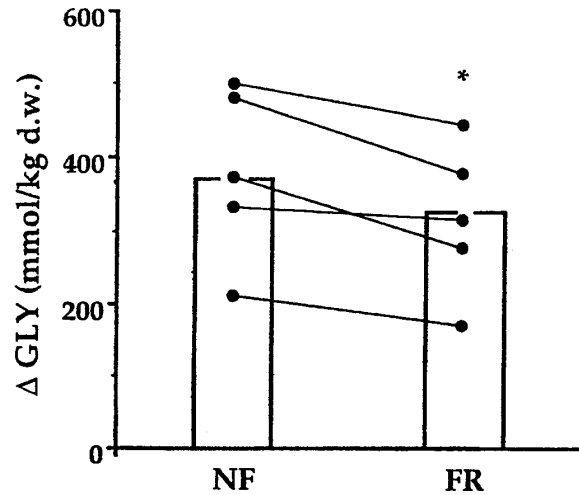


Fig. Net muscle glycogen utilization ( $\Delta$ GLY; pre- to postexercise) during 120 min of exercise at 67% peak  $O_2$  uptake FR and NF. Mean (open bars) and individual data (●) are plotted;  $n = 5$  men. \*Significantly different mean value from NF,  $P < 0.05$ . (20)

図7. 水分補給・非補給による運動前・中・後の実質筋グリコーゲン利用の比較 (20)

であれば、筋グリコーゲン利用率の減少やランニング・パフォーマンスの向上が期待できると報告<sup>21)</sup>。Yaspelkis et al. は運動強度の適切な調整によって運動時の CHO 摂取が筋グリコーゲン利用を節約する事において結果的に運動パフォーマンス向上に役立っていると報告<sup>22)</sup>。Venturea et al. は Glucose、Fructose を運動前に補給し Plasma glucose, Insulin, Plasma lactate 系の濃度変化を指標として有酸素反応依存のエネルギー代謝を解析し運動パフォーマンスを検討<sup>23)</sup>している。Riadell et al. は13-17才若年被験者に60%  $\dot{V}O_{2max}$  で30分間の運動を行わせ、遊離脂肪酸 (FFA)、Glucose、CHO-Oxidation、間接的カロリーメトリー、HR、呼吸商、RPE 等を指標として運動パフォーマンス効果を検索、各種パラメータにおいて15-25-45%の数値減少を記録したと報告<sup>24)</sup>している。

Echegaray et al. は暑熱下の運動負荷前の CHO 摂取が血中 Glucose や Insulin を含む生体反応を如何に修飾するかを検索し、脱水症の再給水戦略を考慮している。33℃暑熱下で50%  $\dot{V}O_{2max}$  の運動を体重の4%減少するまで遂行し、血清 Insulin の増加や血漿ノルアドレナリン (NA) の増加が排給水群において増加するが、運動前

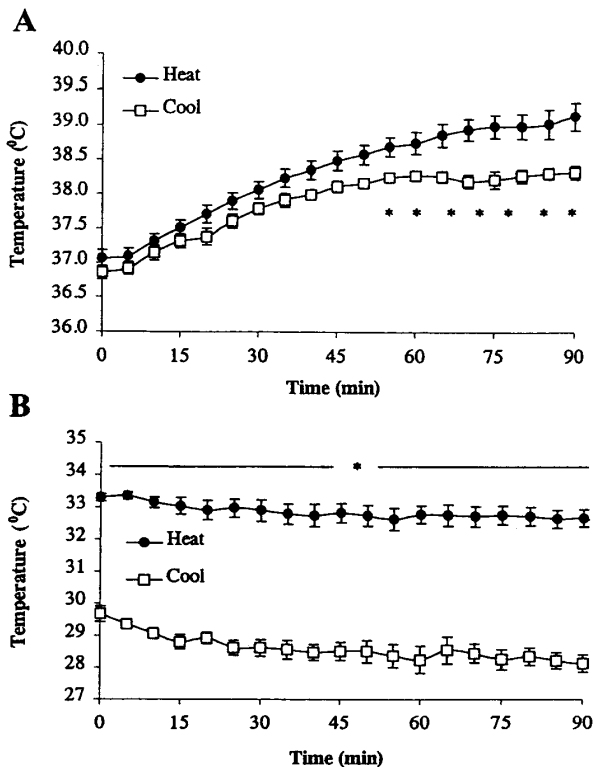


Fig. Rectal temperature (A;  $n = 8$  subjects) and weighted mean skin temperature (B;  $n = 9$  subjects) during exercise in heat and cool trials while subjects were ingesting a carbohydrate solution. Values are means  $\pm$  SE. \*Significant difference between heat and cool trials,  $P < 0.05$ . (26)

### 図 8. 暑熱・寒冷下における運動中、含水炭素補給が直腸熱・皮膚温に及ぼす影響 (26)

に適量の水補給において有意に減少すると報告している。

以上、最近の関連論文を簡単に紹介したが、以下高温環境下における運動中の CHO 摂取が Glycogen 利用への修飾に関する、Jentjens et al. の論文<sup>29)</sup>を比較的詳しく紹介する。

運動中の含水炭素 (CHO) の摂取が、筋グリコーゲン利用に及ぼす効果はよくわからない。環境温が高いと筋グリコーゲンの利用量が増えるとされているが、外因性 CHO の利用への影響は不明である。従って本研究では、高温下で摂取 CHO の酸化速度が低下することを検証する

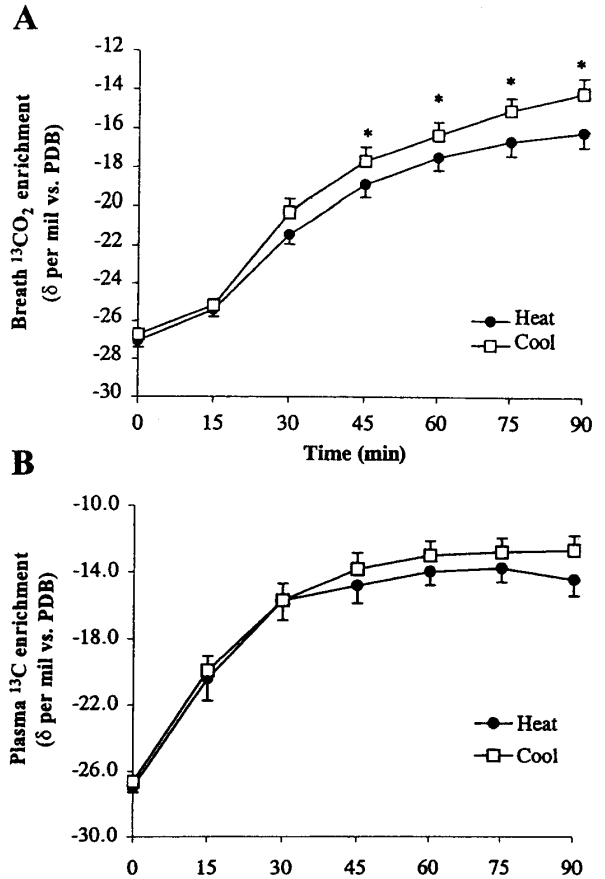


Fig. Breath <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> (A) and plasma [U-<sup>13</sup>C] glucose (B) enrichment during exercise in heat and cool trials while subjects were ingesting a carbohydrate solution. Values are means  $\pm$  SE;  $n = 9$ . PDB, Pee Dee Belleminitella. \*Significant difference between heat and cool trials,  $P < 0.05$ . (26)

### 図 9. 暑熱・寒冷下における運動中、外部よりの含水炭素補給によって呼気ガス分析及び血漿グルコース濃度から外因性グルコースの酸化速度を計算している (26)

ために以下の実験方法を駆使している。即ち、被験者：9名の男運動鍛錬者、最大酸素摂取量 (65ml/kg/min) ※実験：低温 (16.4°C) と高温 (35.4°C) 下で90分の55%Wmaxの自転車漕ぎ運動。※糖液採取：<sup>13</sup>Cで標識したブドウ糖を加えた8%ブドウ糖液を運動前に8ml/kg運動中は15分毎に3ml/kg。※測定：心拍数、体重、直腸温、皮膚温、15分毎の採気(呼気ガスの<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C、血漿<sup>13</sup>C-Glucose濃度から、脂肪、総CHO、筋グリコーゲン、肝由来のブドウ糖、血漿ブドウ糖、外因性ブドウ糖の酸化速度の計算している。結果としては、※運動の最後



表3. 暑熱と寒冷下における筋運動中の生体反応での比較 (26)

Table. Oxygen uptake, ventilation rate, respiratory exchange ratio, heart rate, rectal temperature, and weighed mean skin temperature, glucose and lactate concentrations during the 60- to 90-min period of exercise in heat and cool trials.

	Heat Trial	Cool Trial	P Value
$\dot{V}O_2$ , ml/min	3,108±82	3,113±91	0.960
$\dot{V}_E$ , l/min	78±3 †	73±2	0.029
RER	0.931±0.009	0.908±0.008	0.164
Glucose, mmol/l	5.0±0.2 †	4.7±0.2	0.034
Lactate, mmol/l	1.5±0.3 †	1.0±0.1	0.047
HR, beats/min	164±5 †	140±4	0.000
$T_{re}$ , °C	38.90±0.19 *†	38.26±0.08 *	0.003
$T_{sk}$ , °C	32.71±0.29 †	28.31±0.29	0.000

Values are means ± SD for 9 subjects except as noted by \*.  $\dot{V}O_2$ , oxygen uptake;  $\dot{V}_E$ , ventilation rate; RER, respiratory exchange ratio; HR, heart rate;  $T_{re}$ , rectal temperature;  $T_{sk}$ , weighted mean skin temperature. † Significantly different from cool trial,  $P < 0.05$ . (26)

表4. 暑熱と寒冷下における筋運動中の筋グリコーゲン利用の比較 (26)

Tables. Substrate utilization calculated during the 60- to 90-min period of exercise in heat and cool trials

	Heat Trial	Cool Trial	P Value
CHO total	3.18±0.15	2.85±0.10	0.087
Fat total	0.36±0.05	0.48±0.05	0.197
Exogenous glucose	0.76±0.06 *	0.84±0.05	0.017
Muscle glycogen	2.07±0.16 *	1.66±0.09	0.042
Plasma glucose	1.12±0.06	1.19±0.04	0.082
Liver-derived glucose	0.36±0.04	0.36±0.04	0.783

Values are presented as means ± SE given in g/min for 9 subjects. CHO, carbohydrate. \*Significantly different from cool trial,  $P < 0.05$ . (26)

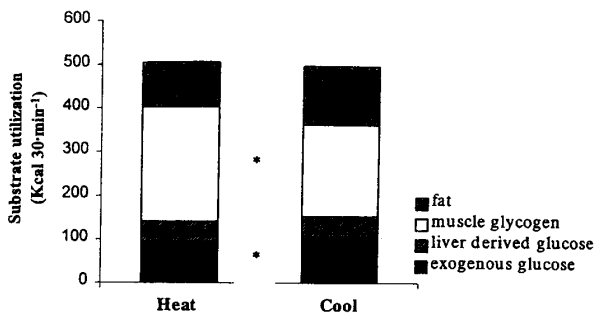


Fig. Energetic contribution (kcal/30 min) of substrates during the 60- to 90-min period of exercise in heat and cool trials. Values are means ± SE;  $n = 9$  subjects. \*Significant difference between heat and cool trials,  $P < 0.05$ . (26)

図10. 暑熱・寒冷下における運動中・栄養基質のエネルギー代謝を比較したもの (26)

の30分間の諸指標：表3参照※直腸温、皮膚温(図8)：高温でいずれも高く、※呼気13C、血漿13C(図9)：高温でいずれも低い。※運動60-90分の基質の酸化：(表4, 図10) 外因性ブドウ糖：高温<低温・肝由来のブドウ糖：高温=低温・総CHO：高温≥低温・血漿ブドウ糖：高温≤低温・筋グリコーゲン：高温>低温・脂肪：高温≤低温※血中代謝物→(図11, 表3)・血糖：高温>低温・乳酸：高温>低温・インスリン、FFAは差なし・※その他：体重減少：高温>低温(-2.1kg/-1.3kg)(両群とも水分摂取：1667ml)・PV減少：高温>低温・心拍数：高温>低温・RPE：高温>低温・GI症状：高温>低温等々の結果を得ており、これらから環境温度のCHO摂取への影響を観察した研究皆無と判断し、Jentjensら<sup>28)</sup>は以下の如く考察を展開している。a)高温で外因性ブドウ糖酸化が減少する理由として、i. Gastric emptying：高温・脱水状態での運動では胃からの排出が遅れるが、脱水がないと遅れない。否定的。ii. 吸収：腸の血流の減少が吸収を抑制し、消化器症状が多くなったという可能性は考え得る。iii.

ウ糖：高温<低温・肝由来のブドウ糖：高温=低温・総CHO：高温≥低温・血漿ブドウ糖：高温≤低温・筋グリコーゲン：高温>低温・脂肪：高温≤低温※血中代謝物→(図11, 表3)・血糖：高温>低温・乳酸：高温>低温・インスリン、FFAは差なし・※その他：体重減少：高温>低温(-2.1kg/-1.3kg)(両群とも水分摂取：1667ml)・PV減少：高温>低温・心拍数：高温>低温・RPE：高温>低温・GI症状：高温>低温等々の結果を得ており、これらから環境温度のCHO摂取への影響を観察した研究皆無と判断し、Jentjensら<sup>28)</sup>は以下の如く考察を展開している。a)高温で外因性ブドウ糖酸化が減少する理由として、i. Gastric emptying：高温・脱水状態での運動では胃からの排出が遅れるが、脱水がないと遅れない。否定的。ii. 吸収：腸の血流の減少が吸収を抑制し、消化器症状が多くなったという可能性は考え得る。iii.

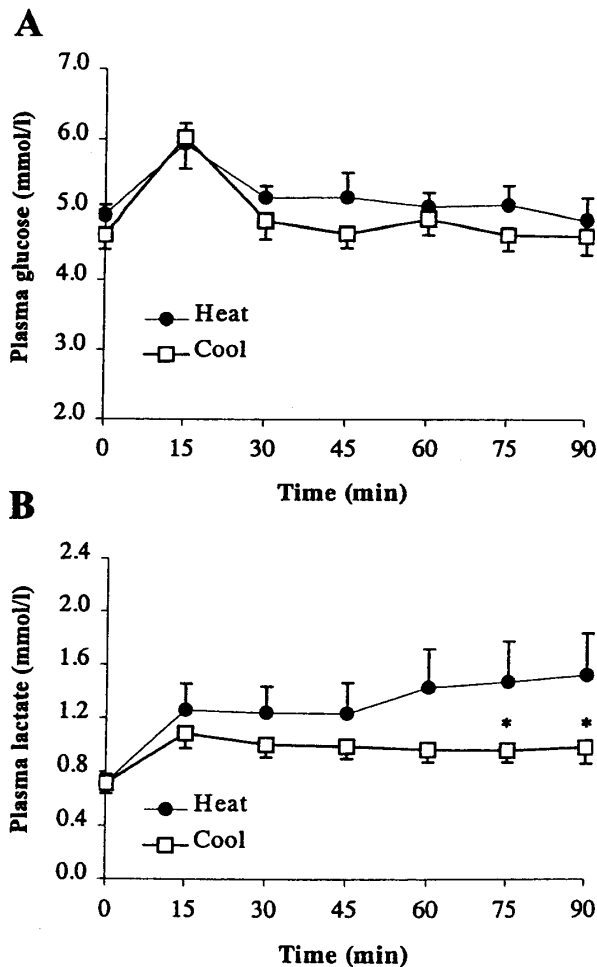


Fig. Plasma glucose (A) and lactate (B) during exercise in heat and cool trials while subjects were ingesting a carbohydrate solution. Values are means  $\pm$  SE;  $n = 9$  subjects. \*Significant difference between heat and cool trials,  $P < 0.05$ . (26)

### 図11. 暑熱・寒冷下における運動中・含水炭素補給による血漿グルコースと乳酸濃度の比較 (26)

肝臓によるブドウ糖の処理：高温で肝の血流が減少するが、肝のブドウ糖産生は亢進するとされ肝の関与は否定的。iv. 筋のブドウ糖摂取の減少：筋の血流の減少によるのは否定的だが、エピネフリンがグリコーゲン分解を促しG-6-Pがブドウ糖摂取を抑制した可能性はあり、これは本研究での血糖の高値と血漿ブドウ糖利用の減少の説明を可能にする。b) 外因性CHOの酸化量について：貯蔵糖質の含有 $^{13}C$ による補正をしていないから酸化量の高値と低温の差が過小評価されている可能性がある。c) 筋グリコーゲン利用の増加について：エピネフ

リンによるグリコーゲン分解の促進が推定される<sup>26)</sup>。

以上の結論として、高温の運動で外因性のCHO酸化が10%減少し、CHO酸化は高温の方が低温より高い傾向で、筋グリコーゲン酸化は高温が25%多かったと言える<sup>26)</sup>。

### 〈附記〉

Hargreaves et al. (文献20) は平成14年6月18日及び、Jentjens et al. (文献26) は平成14年7月2日の中京大学大学院体育学研究科運動生理教室の定例抄読会で夫々小坂(文献20)及び松井(文献26)によって抄読された論文であることを茲に附記する。

### 〈まとめ〉

筋収縮運動の原動力は糖質(Glycogen)や脂質(Fat)の代謝エネルギーに起因し、即ち、ミトコンドリアから発生した熱エネルギーを仕事エネルギーへ変換したものである。本総説ではこの化学反応過程で人の体温が上昇し、筋運動パフォーマンスを含めて全ての生体機能に甚大な影響を及ぼしていることを紹介し、筋運動中の水分補給がこれらの反応を修飾している実態を筋グリコーゲン利用を含む反応指標の変化を示しつつ解説した。

### 〈謝辞〉

本総説論文作成過程で多々ご協力、ご支援を頂いた、中京大学体育研究所及び大塚製薬株式会社(大塚ペパレジ株式会社)の各位に対し、茲に衷心よりお礼を申し上げます。

### (参考文献)

- (1) 小坂光男、山根基、松本実、加藤貴英、松井信夫. 温熱ストレスによる生体機能の修飾. 中京大学体育学論叢43(1):77-86. 2001.
- (2) 小坂光男、平田学、山根基、松本実、

- 加藤貴英、大西範和. 暑熱・運動時熱中症の予防対策と水補給. 中京大学体育学論叢43(2): 55-64. 2002.
- (3) Shimizu T, Kosaka M, Fujishima K. Human thermoregulatory responses during prolonged walking in water at 25, 30 and 35 degrees C. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 78(6): 473-478. 1998.
- (4) 中野昭一、吉岡利忠. 「図解生理学 (中野昭一編)」医学書院 東京470-472. 1981.
- (5) Taimura A, Matsumoto T, Hee T-B, Othman T, Yamauchi M, Sugawara M, Kosaka M. Effects of fluid ingestion during intermittent high intensity swimming exercise on thermoregulatory response and performance. *Tropical Medicine* 41(2): 65-73. 1999.
- (6) Gao JP, Costill DL, Horswill CA, Park SH. Sodium bicarbonate ingestion improves performance in interval swimming. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 58(1-2): 171-174. 1988.
- (7) Cade JR, Reese RH, Privette RM, Hommen NM, Rogers JL, Fregly MJ. Dietary intervention and training in swimmers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 63(3-4): 210-215. 1991.
- (8) Maresh CM, Bergeron MF, Kenefick RW, Castellani JW, Hoffman JR, Armstrong LE. Effect of overhydration on time-trial swim performance. *J Strength Cond Res.* 15(4): 514-518. 2001.
- (9) Kosaka M. Personal Communication. 2002.
- (10) Wemple RD, Morocco TS, Mack GW. Influence of sodium replacement on fluid ingestion following exercise-induced dehydration. *Int J Sport Nutr.* 7(2): 104-116. 1997.
- (11) McConell GK, Burge CM, Skinner SL, Hargreaves M. Influence of ingested fluid volume on physiological responses during prolonged exercise. *Acta Physiol Scand.* 160(2): 149-156. 1997.
- (12) Mudambo KS, Leese GP, Rennie MJ. Dehydration in soldiers during walking/running exercise in the heat and the effects of fluid ingestion during and after exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 76(6): 517-524. 1997.
- (13) Mack GW. Recovery after exercise in the heat-factors influencing fluid intake. *Int J Sports Med.* 19 Suppl 2: S139-141. 1998.
- (14) Nassis GP, Williams C, Chisnall P. Effect of a carbohydrate-electrolyte drink on endurance capacity during prolonged intermittent high intensity running. *Br J Sports Med.* 32(3): 248-252. 1998.
- (15) Galloway SD. Dehydration, rehydration, and exercise in the heat: rehydration strategies for athletic competition. *Can J Appl Physiol.* 24(2): 188-200. 1999.
- (16) Kay D, Marino FE. Fluid ingestion and exercise hyperthermia: implications for performance, thermoregulation, metabolism and the development of fatigue. *J Sports Sci.* 18(2): 71-82. 2000.
- (17) Rehrer NJ. Fluid and electrolyte balance in ultra-endurance sport. *Sports Med.* 31(10): 701-715. 2001.
- (18) Candas V, Libert JP, Brandenberger G, Saggot JC, Kahn JM. Thermal and circulatory responses during prolonged exercise at different levels of hydration. *J Physiol (Paris).* 83(1): 11-8. 1988.
- (19) Cian C, Barraud PA, Melin B, Raphel C. Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration. *Int J Psychophysiol.* 42(3): 243-251. 2001.
- (20) Hargreaves M, Dillo P, Angus D, Febbraio M. Effect of fluid ingestion on muscle metabolism during prolonged exercise. *J Appl Physiol.* 80(1): 363-366. 1996.
- (21) Noakes TD, Lambert EV, Lambert MI, McArthur PS, Myburgh KH, Benade AJ. Carbohydrate ingestion and muscle glycogen depletion during marathon and ultramarathon

- racing. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 57(4): 482-489. 1988.
- (22) Yaspelkis BB 3 rd, Patterson JG, Anderla PA, Ding Z, Ivy JL. Carbohydrate supplementation spares muscle glycogen during variable-intensity exercise. *J Appl Physiol.* 75(4): 1477-1485. 1993.
- (23) Ventura JL, Estruch A, Rodas G, Segura R. Effect of prior ingestion of glucose or fructose on the performance of exercise of intermediate duration. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 68(4): 345-349. 1994.
- (24) Riddell MC, Bar-Or O, Schwarcz HP, Heigenhauser GJ. Substrate utilization in boys during exercise with [13C]-glucose ingestion. *Eur J Appl Physiol.* 83(4-5): 441-448. 2000.
- (25) Echegaray M, Armstrong LE, Maresh CM, Riebe D, Kenefick RW, Castellani JW, Karvouras S, Casa D. Blood glucose responses to carbohydrate feeding prior to exercise in the heat: effects of hypohydration and rehydration. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 11(1): 72-83. 2001.
- (26) Jentjens RL, Wagenmakers AJ, Jeukendrup AE. Heat stress increases muscle glycogen use but reduces the oxidation of ingested carbohydrates during exercise. *J Appl Physiol.* 92(4): 1562-1572. 2002.