

# カーボローディングが 体水分状態と暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響

宮崎大学 塩瀬圭佑  
(共同研究者) 福岡大学 富賀理恵  
北海学園大学 内藤貴司  
鹿屋体育大学 藤田英二

## Effects of Carbohydrate Loading on Hydration Status and Thermoregulatory Responses During Exercise in a Hot Environment

by

Keisuke Shiose

*Faculty of Education, University of Miyazaki*

Rie Takae-Tomiga

*Faculty of Sports and Health Sciences, Fukuoka University*

Takashi Naito

*Faculty of Law, Hokkai-Gakuen University*

Eiji Fujita

*Faculty of Sports and Life Science,  
National Institute of Fitness and Sports in Kanoya*

### ABSTRACT

In this study, we investigated the effects of carbohydrate loading on hydration status and thermoregulatory responses during exercise in a hot environment.

Ten healthy adult males consumed either a standard diet (CON condition; carbohydrate:  $6.1 \pm 0.5$  g/kg BW/day) or a high-carbohydrate diet (CL condition; carbohydrate:  $11.2 \pm 0.6$  g/kg BW/day) for three consecutive days. Total body water

(TBW) was assessed using the stable isotope dilution method. Participants performed 40 minutes of cycling at 60%  $\text{VO}_{2\text{max}}$  in a hot environment (31°C, 70% relative humidity). Rectal temperature ( $T_{\text{re}}$ ) and mean skin temperature ( $T_{\text{sk}}$ ) were measured before exercise and every 10 minutes during exercise. TBW after exercise was estimated by subtracting sweat loss from the pre-exercise TBW.

Pre-exercise TBW was significantly higher in the CL condition compared to the CON condition ( $37.7 \pm 4.7$  kg vs.  $37.0 \pm 4.9$  kg,  $p < 0.05$ ). After 40 minutes of exercise, both  $T_{\text{re}}$  and  $T_{\text{sk}}$  increased in both conditions, with no significant interaction. Since sweat loss did not differ significantly between the two conditions, post-exercise TBW remained significantly higher in the CL condition than in the CON condition ( $36.9 \pm 4.8$  kg vs.  $36.2 \pm 4.8$  kg,  $p < 0.05$ ).

In conclusion, while carbohydrate loading did not significantly alter thermoregulatory responses, it may help maintain body water content during exercise in a hot environment.

#### キーワード

カーボローディング, 体水分量, 深部体温, 体温調整, 暑熱環境

#### Keyword

Carbohydrate loading, Total body water, Core temperature, Thermoregulation, Hot environment

## 要 旨

本研究では、カーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に与える影響を調査した。成人男性10名は、標準食 (CON条件, 炭水化物  $6.1 \pm 0.5$  g/kg 体重/日) または高糖質食 (CL条件, 炭水化物  $11.2 \pm 0.6$  g/kg 体重/日) を3日間摂取した。体水分量を安定同位体希釈法を用いて測定し、温度31°C, 相対湿度70%の下、60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 強度で40分間の自転車運動を行った。運動前および運動中10分ごとに直腸温 ( $T_{\text{re}}$ ) と平均皮膚温 ( $T_{\text{sk}}$ ) を測定した。運動前後の体重差から発汗量を算出し、運動前の体水分量から減じて運動後の体水分量を推定した。運動前の体水分量はCL条件で有意に高かった ( $p < 0.05$ )。  $T_{\text{re}}$  および  $T_{\text{sk}}$  は運動中に上昇したが、条件間差は認め

られなかった。発汗量に差はなく、運動後の推定体水分量はCL条件の方が高値であった ( $p < 0.05$ )。以上より、カーボローディングは暑熱環境下運動時の体温変動には影響を及ぼさないが、運動中の体水分量の保持に寄与する可能性が示唆された。

## 背 景

暑熱環境下での運動においては、脱水や過度な深部体温の上昇が運動パフォーマンスの低下や熱中症の発生要因となることが知られている<sup>1)</sup>。これらを防ぐため、運動前の身体冷却、水分補給、運動前の体水分量増加を目的とした栄養戦略など、様々な暑熱対策が開発・実践されている。

運動前に体水分量を増加させることは、脱水の進行を遅延させ、運動時の体温上昇を抑制する可能性がある。運動を実施する数時間から数日前よ

りクレアチンやグリセリンの摂取量を増加させるクレアチンローディングやグリセリンローディングといわれる栄養戦略がある。これらの方法によって、体水分量が数百グラムから1.5 kg程度増加するとともに<sup>2-4)</sup>、運動中の深部体温上昇が軽減されることや<sup>5)</sup>、運動中の脱水が抑制されることが報告されている<sup>6)</sup>。以上より、これらの栄養戦略は暑熱対策として一定の有効性を有すると考えられている。

数日間にわたり8-12g/kg体重/日の糖質を摂取し、骨格筋内に貯蔵されたグリコーゲン量が通常の2倍程度まで増加させるカーボローディングといわれる栄養戦略がある<sup>7)</sup>。筋グリコーゲンは運動時の主要なエネルギー基質であり、その貯蔵量の増加によって主には持久性パフォーマンスの向上が期待される<sup>8)</sup>。そのため、持久性アスリートにおいては、試合直前にパフォーマンス向上を目的にカーボローディングが実践されることがある。一方、カーボローディングを行うことで、体水分量の増加に起因する体重の増加が生じることが広く知られる。先行研究では、クレアチンローディングやグリセリンローディングと同様に、カーボローディングによっても体水分量が数百グラムから1.5kg程度増加することが報告される<sup>9,10)</sup>。また、カーボローディングによる体水分量増加の背景として、グリコーゲンの高い親水性により、グリコーゲン1gあたり約3-4gの水分が骨格筋内に結合・貯蔵されるためであると考えられる<sup>11)</sup>。

しかし、カーボローディングの暑熱対策としての有効性に着目した研究は非常に限定的である。唯一、Pitsiladis et al.の研究において、カーボローディング実施時における暑熱環境下持久性運動時の体温変動とパフォーマンスが報告されており、持続可能運動時間の延長が認められた一方、体温変動に対するは明確な影響は示されなかった<sup>12)</sup>。ただし、この研究では体水分量が測定されておら

ず、カーボローディングにより体水分量の増加が生じていたかや、運動中の脱水状況の違いがあったかについては不明であった。以上のように、カーボローディングが暑熱環境下運動時に及ぼす影響に関する先行研究は限られており、運動条件や評価項目も限定的であるという点から更なる検討の余地がある。

そこで、本研究ではカーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 1. 方法

### 1.1 対象者

本研究は10名の成人男性(年齢 $20 \pm 2$ 歳, 身長 $171.0 \pm 4.3$  cm, 体重 $65.6 \pm 9.8$  kg, BMI $22.4 \pm 3.2$  kg/m<sup>2</sup>, VO<sub>2</sub>max $39.5 \pm 7.5$  mL/kg/min)を対象に、2024年と2025年の3月に実施された。全ての対象者は部活動、地域スポーツクラブ活動、授業等において日常的な運動習慣をしていた。全ての対象者に対し、研究の方法および危険性について口頭で説明し、同意を得た後で署名によるインフォームド・コンセントを取得した。本研究は宮崎大学教育学部倫理審査委員会(承認番号:2023-16-E-1201)および鹿屋体育大学自然科学系倫理審査小委員会(承認番号:23-1-61号)による承認を得て実施された。

### 1.2 介入条件

対象者は標準食を摂取する条件(CON条件)、または高糖質食を摂取する条件(Carbohydrate loading; CL条件)のいずれかに、無作為に振り分けられた。それぞれの条件において、対象者は規定された食事を3日間摂取し、その前後で各測定を行った。実験期間中、水は自由摂取とし、トレーニング等の日常生活を超える運動は実施しないよう指示をした。本研究は、ランダム化クロスオーバーデザインで実施され、全ての対象者がCON

条件とCL条件の両条件をランダム順で実施した。

### 1. 3 介入前後の測定

全ての対象者は事前に、自転車エルゴメータ（風神雷神，株式会社OCL，東京）を用いて最大酸素摂取量（ $VO_2max$ ）の測定を実施した。 $VO_2max$ の測定は、先行研究を参考に<sup>2)</sup>、常温環境下（21℃）で行った。運動中は呼気ガス分析装置（AE-310S，株式会社ミナト医科学，大阪）を用いて呼気ガスを採取・分析し、酸素摂取量を算出した。酸素摂取量と負荷量の関係式を作成し、各対象者における100%および60% $VO_2max$ に相当する運動負荷を決定した。

本研究の概要を図1に示す。実験1日目、対象者は起床後に280 mLの水のみを摂取し、8時間以上の絶食状態で来研した。その後、排尿を済ませた上で、体重計（HW-100KC，A&D社製，東京）を用いて0.01kg単位で体重を測定した。CL条件では、筋グリコーゲン量の低下を目的として、約60分間の高強度間欠式自転車運動を行った（枯渇運動）。枯渇運動は、先行研究に準じて<sup>13)</sup>、100% $VO_2max$ 強度で1分間の運動を、30Wでの4分間のインターバルを挟み、計12セット実施した。

そして、CON条件とCL条件において規定された食事を3日間にわたり摂取した。

実験4日目には、1日目と同様の条件で体重の測定を行い、さらに空気置換法および安定同位体希釈法を用いて身体組成を測定した。その後、先行研究を参考に<sup>2)</sup>、気温31℃、相対湿度70%に設定された環境試験室（ESPEC社，大阪）にて10分の安静後、自転車エルゴメータを用いて60% $VO_2max$ 強度で40分間の持久性運動を実施した。運動中は、先行研究に従い<sup>2)</sup>、10分おきに体重1kgあたり2.14 gの室温の水を摂取した。運動前後で裸体体重を測定し、発汗量を算出した。

### 1. 4 食事内容

CON条件とCL条件では、それぞれ2,000 kcal/日、2,500 kcal/日、3,000 kcal/日の3種類の食事内容を設定し、対象者の性別、年齢、体重から推定した総エネルギー消費量に近似するエネルギー量の食事を提供した。各条件におけるエネルギー摂取量および栄養素量の概要を表1に示す。CON条件では6.1 g/kg 体重/日の炭水化物が摂取され、CL条件では11.2 g/kg 体重/日の炭水化物が摂取された。

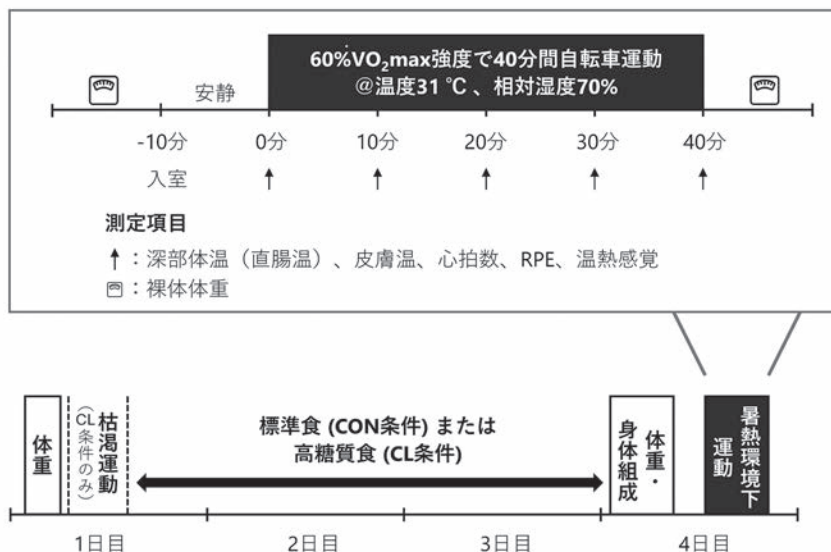


図1 研究の概要

表 1 各介入条件のエネルギー摂取量, 栄養素量

	CON条件	CL条件
エネルギー (kcal/日)	2716±243	3458±397
たんぱく質 (g/日)	97±6	94±5
脂質 (g/日)	82±9	26±7
炭水化物 (g/日)	397±38	731±81
(g/kg/日)	6.1±0.5	11.2±0.6
PFC比	14:27:58	11:7:83

数値は平均値±標準偏差で示す

### 1. 5 身体組成

身体密度はBOD POD (COSMED SRL社, イタリア)を用いた空気置換法により測定した。体水分量は安定同位体希釈法により測定した。安定同位体希釈法では, 推定体水分量あたり0.06gの重水素 (Deuterium Oxide filtered  $\geq 99.8$  atom% D, 太陽日酸株式会社, 東京) を経口投与した。推定体水分量は体脂肪率を15%, 除脂肪組織の水和率を73.2%と仮定して算出した。尿サンプルは, 投与前, 投与3時間後, 投与4時間後に自然採尿により採取し,  $-30^{\circ}\text{C}$ で保管した。尿中の安定同位体比は, 安定同位体比質量分析計 (Hydra 20-20 Stable Isotope Mass Spectrometer, Sercon, Crewe, UK) を用いて測定した。測定された安定同位体比から, 先行研究に基づき<sup>14, 15)</sup>, 体水分量を算出した。得られた身体密度と体水分量から, 3成分モデルによって脂肪量, 体脂肪率, 除脂肪量を算出し<sup>16)</sup>, 除脂肪量から体水分量を差し引いて除脂肪固形量を求めた。

### 1. 6 暑熱環境下運動時の主観的運動強度, 温熱感覚, 心拍数, 体温

暑熱環境下での40分の持久性運動時では, 主観的運動強度 (RPE), 温熱感覚, 心拍数, 深部体温, 皮膚温を10分ごとに測定した。RPEの測定にはBorgスケールを用い<sup>17)</sup>, 温熱感覚の測定には21段階のスケール ( $-10$ ; 非常に寒い,  $+10$ ; 非常に暑い,  $0$ ; どちらでもない) を用いた<sup>18)</sup>。

深部体温は直腸温 ( $T_{re}$ ) で評価された。 $T_{re}$ は, デサントスポーツ科学 Vol. 47

直腸温用プローブ (ITP010-11, 日機装サーモ社, 東京) とデータロガー (N543, 日機装サーモ社, 東京) により $0.01^{\circ}\text{C}$ 単位で記録された。プローブには専用ゴムカバーを装着し, 潤滑剤を塗布の上, 先端を肛門から10-15cm挿入して測定を行った。皮膚温は, ボタン型温度ロガー (サーモクロンSL, KNラボラトリー, 大阪) により $0.5^{\circ}\text{C}$ 単位で記録された。ボタン型温度ロガーは専用ゴムカバーを装着し, 腕前, 胸部, 大腿前の3点に固定した。平均皮膚温 ( $T_{sk}$ ) は先行研究に基づき<sup>19)</sup>, 以下の式で算出した:

$$T_{sk} = 0.43 \times \text{胸部皮膚温} + 0.25 \times \text{上腕部皮膚温} + 0.32 \times \text{大腿部皮膚温}$$

### 1. 7 発汗量, 運動後の体水分量

運動前後に汗を十分に拭きとった状態で裸体体重を $0.05$  kg単位で測定し, 以下の式を用いより発汗量を算出した:

$$\text{発汗量} = \text{運動前体重} - (\text{運動後体重} + \text{運動時飲水量})$$

また, 運動前の体水分量から発汗量を減じ, 運動後の体水分量を推定した。

## 2. 統計

結果は全て平均値±標準偏差で示した。体重および暑熱環境下運動時の評価項目については, 繰り返しのある二元配置分散分析により条件間の差を検討した。有意な交互作用が認められた場合には, Bonferroni法による多重比較検定を用いた。その他の評価項目は, 対応のあるt検定により条件間の差を検討した。統計処理はSPSS Statistics

ver.27 (IBM社製) を用いて実施し、有意水準は5%未満とした。

### 3. 結果

#### 3.1 身体組成

体重は有意な条件×時間の交互作用が認められた ( $p = 0.009$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.552$ )。実験1日目の体重に条件間で有意な差はなかった (CON条件  $65.9 \pm 9.7$  kg, CL条件  $65.7 \pm 10.0$  kg,  $p = 0.441$ )。一方、実験4日目の体重は条件間に有意差があり

(CON条件  $65.4 \pm 9.6$ , CL条件  $66.0 \pm 9.9$  kg,  $p = 0.004$ )、CL条件で高値を示した。実験4日目の身体組成を表2に示す。除脂肪量、体水分量は、条件間に有意差があり (いずれも  $p < 0.05$ )、CL条件で高値を示した。一方、体脂肪量および除脂肪固形量には条件間で有意な差は認められなかった。

#### 3.2 主観的運動強度 (RPE)、温熱感覚、心拍数

暑熱環境下運動時のRPE、温熱感覚、心拍数

表2 身体組成の比較

		CON条件	CL条件
体重	(kg)	$65.4 \pm 9.5$	$66.0 \pm 9.9^{**}$
体脂肪量	(kg)	$13.9 \pm 6$	$13.2 \pm 5.4$
除脂肪量	(kg)	$55.7 \pm 6.2$	$56.6 \pm 6.3^{**}$
体水分量	(kg)	$37.0 \pm 4.9$	$37.7 \pm 4.7^*$
除脂肪固形	(kg)	$18.7 \pm 1.6$	$18.8 \pm 1.8$

数値は平均値±標準偏差で示す。\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$  vs CON条件。

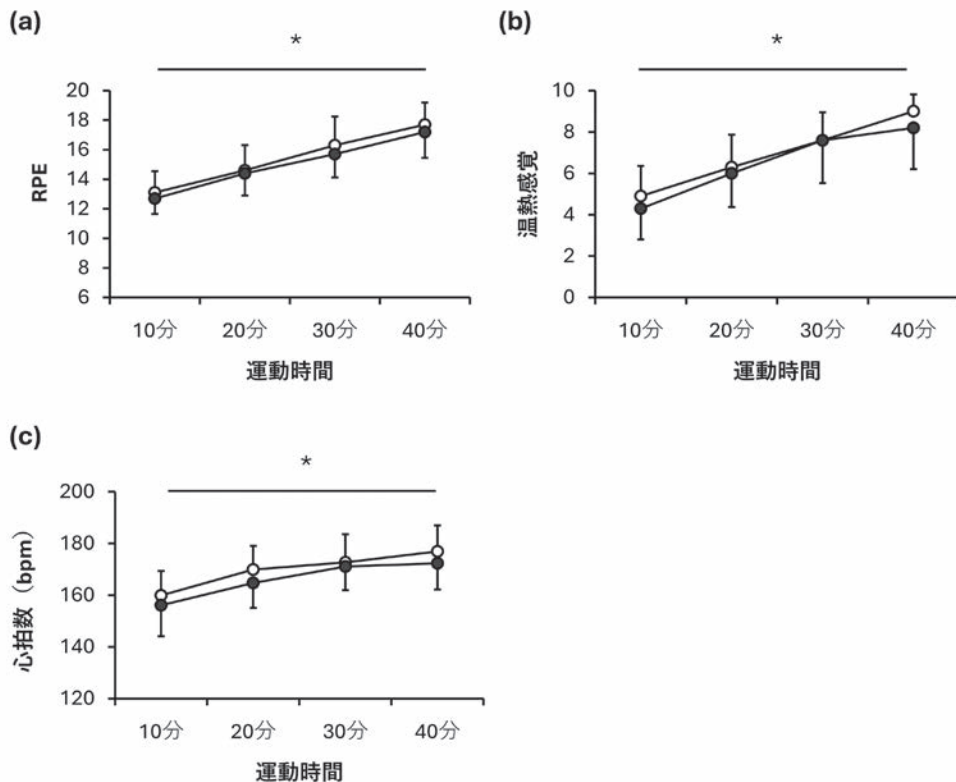


図2 暑熱環境下運動時の (a) 主観的運動強度, (b) 温熱感覚, (c) 心拍数の変化  
平均値±標準偏差で示す。○CON条件, ●CL条件。時間の主効果 \* $p < 0.05$ 。

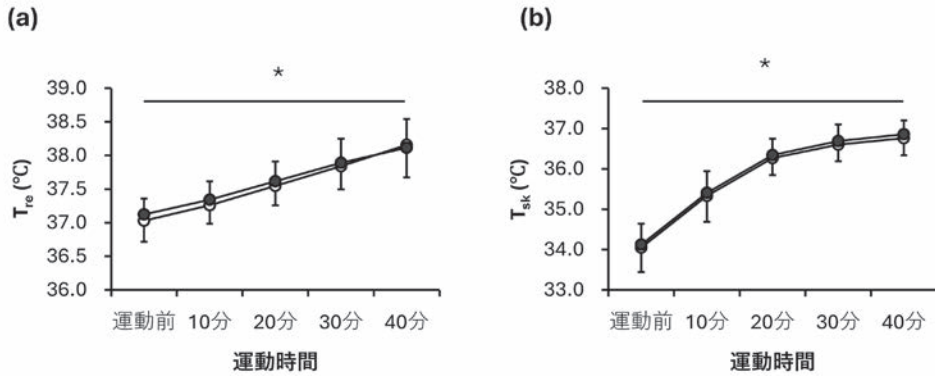


図3 暑熱環境下運動時の (a) 直腸温, (b) 平均皮膚温の変化  
 平均値±標準偏差で示す。○CON条件, ●CL条件. 時間の主効果 \* $p < 0.05$ .

の変化を図2に示す。RPE, 温熱感覚, 心拍数はいずれも運動中に有意に変化し(時間の主効果: RPE  $p < 0.01$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.949$ ; 温熱感覚  $p < 0.01$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.922$ ; 心拍数  $p < 0.01$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.949$ ), 運動時間が経過するごとに高値を示した。しかし, RPEと温熱感覚に有意な条件×時間の交互作用は認められなかった (RPE  $p = 0.688$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.052$ ; 温熱感覚  $p = 0.279$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.132$ )。心拍数は条件間で差がある傾向が認められ(条件の主効果  $p = 0.075$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.310$ ), CL条件で低値を示した。しかし, 心拍数に有意な条件×時間の交互作用は認められなかった ( $p = 0.360$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.107$ )。

### 3. 3 深部体温 ( $T_{re}$ ), 平均皮膚温 ( $T_{sk}$ )

暑熱環境下運動時の  $T_{re}$  と  $T_{sk}$  の変化を図3に示す。  $T_{re}$  と  $T_{sk}$  は運動中に有意に変化し(時間の主効果:  $T_{re}$   $p < 0.01$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.927$ ;  $T_{sk}$   $p < 0.01$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.985$ ), 運動時間が経過するごとに高値を示した。  $T_{re}$  は, CON条件で  $37.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$  から  $38.2 \pm 0.4^\circ\text{C}$ , CL条件では  $37.1 \pm 0.2^\circ\text{C}$  から  $38.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$  へと上昇した。  $T_{re}$  に条件×時間の交互作用は認められなかった ( $p = 0.202$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.169$ )。  $T_{sk}$  も同様に, CON条件では  $34.1 \pm 0.6^\circ\text{C}$  から  $36.8 \pm 0.4^\circ\text{C}$ , CL条件では  $34.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$

から  $36.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$  へと上昇し, 条件×時間の交互作用は認められなかった ( $p = 0.977$ ,  $\text{partial } \eta^2 = 0.001$ )。

### 3. 4 発汗量, 運動後の体水分量

発汗量はCON条件で  $0.79 \pm 0.25$  kg, CL条件で  $0.77 \pm 0.27$  kgであり, 条件間で有意な差は認められなかった ( $p = 0.770$ , Cohen's  $d = 0.095$ )。運動後の推定体水分量はCON条件で  $36.2 \pm 4.8$  kg, CL条件で  $36.9 \pm 4.8$  kgであり, 条件間に有意差があり ( $p = 0.008$ , Cohen's  $d = 1.082$ ), CL条件で高値を示した。

## 4. 考 察

本研究では, 3日間のカーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に及ぼす影響を検討した。その結果, CL条件では運動前に体水分量の増加が生じたが, 暑熱環境下運動時における深部体温と平均皮膚温には変化が認められなかった。一方, CL条件では運動後においても体水分量が高い状態が維持されていた。

本研究では, CL条件において, 体重, 除脂肪量, 体水分量が高値を示した。本研究では, カーボローディング前後で直接的に身体組成の評価を行っていないものの, 先行研究においてはカーボ

ローディング後の体重および体水分量の増加が報告される<sup>9,10)</sup>。したがって、CL条件とCON条件の身体組成の差はカーボローディングによる身体組成変化を反映した可能性が高い。体水分量の増加には、筋グリコーゲンの蓄積に伴う結合水の増加が寄与していると考えられる。グリコーゲンは分子構造上、親水性が高く、骨格筋内に貯蔵される際に一定の水分と結合すると考えられる(結合水)。本研究では筋グリコーゲン量を測定していないが、CL条件での糖質摂取量は11.2 g/kg体重/日であり、36-48時間で筋グリコーゲン量が約2倍増加することを報告した先行研究の摂取量と同程度であった<sup>10,20,21)</sup>。また、カーボローディングによる筋グリコーゲンの超回復は、事前に筋グリコーゲン量の減少があった部位に特異的に生じる<sup>7)</sup>。本研究では事前に自転車運動を行っており、下肢筋群において筋グリコーゲンの蓄積があったと推察される。本研究対象者と年齢、体格が近似した日本人男性における下肢筋量の報告や<sup>22)</sup>、標準的な筋グリコーゲンの単位組織量あたり貯蔵量から<sup>23)</sup>、下肢筋群には通常150g程度の筋グリコーゲンが貯蔵されていると見積もられる。さらに、1gのグリコーゲン分子に対し約3-4gの水分が結合すると推察されているという先行研究の報告からも<sup>11)</sup>、CL条件で観察された約0.7 kgの体水分量の増加は、下肢筋群における筋グリコーゲン量の増加が主な要因であると考えられる。

暑熱環境下での運動時に生じる過度な体温の上昇は、運動パフォーマンスの低下や、熱中症の誘因となる。先行研究では、クレアチンローディングやグリセリンローディングによって体水分量が増加し、これにより深部体温の上昇が抑制されることが報告されている<sup>2,24)</sup>。本研究は、カーボローディングが体水分状態および暑熱環境下運動時の体温変動に与える影響を初めて報告したものである。CL条件ではCON条件と比べ体水分量が高値を示し、この差はクレアチンローディングやグリ

セリンローディングによって生じる体水分の増加量と同程度であった<sup>2,24)</sup>。しかし、CL条件ではカーボローディングが暑熱環境下の運動時の $T_{re}$ や $T_{sk}$ に与える明確な影響は示されなかった。この結果について、カーボローディング時に増加する体水分の性質が関与している可能性がある。グリセリンローディングでは、細胞内液と細胞外液のいずれも増加することが報告されている<sup>2)</sup>。一方、カーボローディングによって生じる体水分の増加は、生体電気インピーダンス法やMRIを用いた研究において、主に細胞内液の増加に起因するとされている<sup>10,25)</sup>。特に、細胞内部に存在する水分の多くは高分子の周囲に密に保持されている結合水であり、細胞外液に含まれる自由水とは異なる熱力学的特性を有すると考えられる<sup>26)</sup>。結合水が体温調整に果たす生理機能は明らかではないものの、カーボローディングによって細胞内液量が増加したことで、体温調整に及ぼす影響が限定的であった可能性がある。一方で、クレアチンローディングでもカーボローディングと同様に細胞内液量を主とする体水分量の増加が起こる<sup>2)</sup>。ただし、カーボローディングでは筋グリコーゲン量の増加に伴って局所的な体水分量の増加が生じる可能性が指摘される<sup>10)</sup>。クレアチンローディングにおける体水分の分布特性は明確ではないが、カーボローディングではこのような局所性が影響し、クレアチンローディングほどの体温調整効果を示さなかった可能性がある。

暑熱環境下運動時のRPEおよび温熱感覚に条件間で差は認められなかった。これは、運動中の $T_{re}$ 、 $T_{sk}$ も条件間に差がなかったことから、両条件において同程度の熱ストレスが加わっていたことが一因と考えられる。一方、運動中の心拍数はCL条件で低値を示す傾向が認められた。本研究では自転車運動を実施したが、CL条件においては体重の増加により相対的負荷量が僅かに低下し、その結果として心拍数の低下傾向が認められ

た可能性がある。一方、ランニングなどの体重が直接的に運動時負荷に影響する運動様式では、体重の増加が相対的負荷の増加につながると考えられる。したがって、カーボローディングが運動時心拍数に及ぼす影響については、運動様式を考慮した更なる検討が必要である。

CL条件では、CON条件と比較して運動中の発汗量に差がなく、運動前後において体水分量が多い状態が保持されていた。脱水は、深部体温の上昇と関連し、運動パフォーマンスの低下や、熱中症発生の一要因となるとされる。本研究では温度31℃、相対湿度71%の暑熱環境下において40分間の中強度持久性運動を実施し、発汗率は1.2 kg/時間に相当した。先行研究では体重の2%に相当する脱水により運動パフォーマンスの低下が惹起されると報告されている<sup>27)</sup>。本研究の環境条件下ではおよそ60分の運動を行った場合に脱水が体重の2%に達すると推定される。一方、CL条件では約0.7 kgの体水分量増加が認められており、この増加分により、体重の2%に相当する脱水が生じるまでの時間をCON条件と比べておよそ40分遅延できると推算される。このように、CL条件において運動後の体水分量が高く保たれていたことは、カーボローディングが暑熱環境下での脱水予防に寄与する可能性を示唆しており、暑熱対策としての一手段としての有効性を支持する結果であった。

本研究の限界としていくつかの点が挙げられる。まず、本研究では対象者数が限定的であった。運動中の深部体温の変化について統計的に有意な差は認められなかったものの、10名中8名において、運動40分後の $T_{re}$ がCL条件で低値を示した。したがって、今後は対象者数を増加させたうえで、カーボローディングが暑熱環境下運動時の体温変動や体水分状態に及ぼす影響を、より高い検出力をもって検討する必要がある。次に、本研究では運動習慣のある一般成人とし、40分間の中強度

デサントスポーツ科学 Vol. 47

自転車運動中の生理応答を調査したが、実際の競技場面においてカーボローディングが暑熱環境下でのパフォーマンスに与える影響については明らかにできなかった。本研究の結果から、カーボローディングによる体水分量の増加が脱水予防に貢献する可能性が示唆された一方で、体重の増加が運動時のエネルギーコストの増加につながる可能性も否定できない。今後の研究では、競技レベルの高いアスリートを含め、より実際的なパフォーマンス評価指標を用いた研究が求められる。

## 結 論

カーボローディングは暑熱環境下における持久性運動時の体温変動に対して明確な影響を及ぼさなかった。一方で、カーボローディングにより生じた体水分量の増加は、運動中の体水分量の保持に寄与した。この結果は、脱水の予防という観点から、カーボローディングが暑熱環境下での対策として有効である可能性を示唆するものである。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり助成を承りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 長谷川博., 暑熱環境下におけるスポーツでの暑さ対策., *フットボールの科学*, **16**: 3-9, (2021)
- 2) Easton C., Turner S., Pitsiladis Y., Creatine and glycerol hyperhydration in trained subjects before exercise in the heat., *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, **17**: 70-91 (2007)
- 3) Volek J.S., Mazzetti S.A., Farquhar W.B., Barnes B.R., Gómez A.L., Kraemer W.J., Physiological responses to short-term exercise in the heat after creatine loading., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **33**: 1101-1108 (2001)
- 4) 西島壮, 征矢英昭., 暑熱下運動時の脱水を防ぐグリセリンローディング., *体育の科学* **54**: 810-814, (2004)

- 5) Kreider R.B., Kalman D.S., Antonio J., Ziegenfuss T.N., Wildman R., Collins R., Candow D.G., Kleiner S.M., Almada A.L., Lopez H.L., International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine., *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, **14**: 18 (2017)
- 6) Latzka W.A., Sawka M.N., Montain S.J., Skrinar G.S., Fielding R.A., Matott R.P., Pandolf K.B., Hyperhydration: tolerance and cardiovascular effects during uncompensable exercise-heat stress., *J. Appl. Physiol.*, **84**: 1858-1864 (1998)
- 7) Bergström J., Hultman E., Muscle glycogen synthesis after exercise: an enhancing factor localized to the muscle cells in man., *Nature*, **210**: 309-310 (1966)
- 8) Bergström J., Hermansen L., Hultman E., Saltin B., Diet, muscle glycogen and physical performance., *Acta. Physiol. Scand.*, **71**: 140-150 (1967)
- 9) Olsson K.E., Saltin B., Variation in total body water with muscle glycogen changes in man., *Acta. Physiol. Scand.*, **80**: 11-18 (1970)
- 10) Shiose K., Yamada Y., Motonaga K., Sagayama H., Higaki Y., Tanaka H., Takahashi H., Segmental extracellular and intracellular water distribution and muscle glycogen after 72-h carbohydrate loading using spectroscopic techniques., *J. Appl. Physiol.*, **121**: 205-211 (2016)
- 11) Shiose K., Takahashi H., Yamada Y., Muscle Glycogen Assessment and Relationship with Body Hydration Status: A Narrative Review., *Nutrients*, **15**: 155 (2022)
- 12) Pitsiladis Y., Maughan R., The effects of exercise and diet manipulation on the capacity to perform prolonged exercise in the heat and in the cold in trained humans., *J. Physiol.*, **517**: 919-930 (1999)
- 13) Shiose K., Tobina T., Higaki Y., Kiyonaga A., Tanaka H., Effectiveness of sub-maximal intermittent exercise on muscle glycogen depletion, PGC-1  $\alpha$  and PDK-4 gene expression., *Open Journal of Molecular and Integrative Physiology*, **2**: 119-126 (2012)
- 14) Yamada Y., Yokoyama K., Noriyasu R., Osaki T., Adachi T., Itoi A., Naito Y., Morimoto T., Kimura M., Oda S., Light-intensity activities are important for estimating physical activity energy expenditure using uniaxial and triaxial accelerometers., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **105** (2009)
- 15) Sagayama H., Yoshimura E., Yamada Y., Ichikawa M., Ebine N., Higaki Y., Kiyonaga A., Tanaka H., Effects of rapid weight loss and regain on body composition and energy expenditure., *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **39**: 21-27 (2014)
- 16) Siri W.E., Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. In: Techniques for Measuring Body Composition (Brozek J, Henschel A, eds.), *National Academy of Sciences*, Washington, DC, 223-244 (1961)
- 17) Borg G.A., Psychophysical bases of perceived exertion., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **14**: 377-381 (1982)
- 18) Watson P., Hasegawa H., Roelands B., Piacentini M.F., Looverie R., Meeusen R., Acute dopamine/noradrenaline reuptake inhibition enhances human exercise performance in warm, but not temperate conditions., *J. Physiol.*, **565**: 873-883 (2005)
- 19) Roberts M.F., Wenger C.B., Stolwijk J., Nadel E.R., Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation., *J. Appl. Physiol.*, **43**: 133-137 (1977)
- 20) Sherman W.M., Costill D.L., Fink W.J., Miller J.M., Effect of exercise-diet manipulation on muscle glycogen and its subsequent utilization during performance., *Int. J. Sports Med.*, **2**: 114-118 (1981)
- 21) Bussau V.A., Fairchild T.J., Rao A., Steele P., Fournier P.A., Carbohydrate loading in human muscle: an improved 1 day protocol., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **87**: 290-295 (2002)
- 22) Abe T., Kearns C.F., Fukunaga T., Sex differences in whole body skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging and its distribution in young Japanese adults., *Br. J. Sports Med.*, **37**: 436-440 (2003)
- 23) Areta J.L., Hopkins W.G., Skeletal Muscle Glycogen Content at Rest and During Endurance Exercise in Humans: A Meta-Analysis., *Sports Med.*, **48**: 2091-2102 (2018)
- 24) Lyons T., Riedesel M., Meuli L., Chick T., Effects of glycerol-induced hyperhydration prior to exercise in the heat on sweating and core temperature., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **22**: 477-483 (1990)
- 25) Nygren A.T., Karlsson M., Norman B., Kaijser L., Effect of glycogen loading on skeletal muscle cross-sectional area and T2 relaxation time., *Acta. Physiol.*

- Scand.*, **173**: 385-390 (2001)
- 26) パスカル・マントレ, 細胞の中の水, 東京大学出版会 (2006)
- 27) Yoshida T., Takanishi T., Nakai S., Yorimoto A., Morimoto T., The critical level of water deficit causing a decrease in human exercise performance: a practical field study., *European Journal of Applied Physiology*, **87**: 529-534 (2002)