# 運動後の血液量変化が発汗機能に及ぼす影響 : 牛乳を用いた熱中症予防のエビデンス

天野 達郎 <sup>1)</sup>, 鈴木 未紗 <sup>1)</sup>, 高松 愛咲美 <sup>1)</sup>, 近藤徳彦 <sup>2)</sup> <sup>1)</sup> 新潟大学教育学部 保健体育・スポーツ科学講座 運動と環境生理学研究室 <sup>2)</sup> 神戸大学大学院人間発達環境学研究科 人に関する応用生理学研究室

### 要旨

これまでの先行研究で、運動後に多量(2L 程度)の牛乳を摂取すると水やスポーツドリンクと 比較して運動後の体液バランスの回復が改善することが報告されている。本研究では、先行研究 よりも少ない量の牛乳摂取でも運動後の体液バランスの回復が加速し、それに伴い汗腺機能が改 善され、さらには引き続き行う持久性運動のパフォーマンスと体温調節機能が向上するのかどう かを検討した。6名の健康な若年男性が間欠運動(Exercise 1、4分運動+5分休息×8セット)を 行い、その直後に体重 1kg あたり 5.45g の牛乳、水もしくはスポーツドリンクを摂取した。その 後3時間安静を保持した時の体重、尿量、尿比重、血液量、赤血球量、血漿量を比較した。Exercise 1の2時間後にイオントフォレーシス法を用いて前腕部におけるピロカルピン誘発性発汗反応(汗 腺機能の指標)を測定し、同3時間後に43℃の湯が流れる水循環スーツを着用して最大運動負荷 の60%強度の自転車運動を継続できなくなるまで行った(Exercise 2)。その結果、Exercise 1後 に摂取する飲料の違いはその後の各体液パラメーターおよびピロカルピン誘発性発汗反応に影響 しなかった (全て P>0.05)。また、Exercise 2 における運動継続時間は飲料条件間で差がなかっ た (P>0.05)。 Exercise 2 のスポーツドリンク条件における平均皮膚温は他の飲料条件より部分 的に低下したものの(P < 0.05)、その低下は他の体温調節反応に影響するほど大きなものでは なかった。これらの結果は、運動後に行う比較的少量の牛乳摂取は他の飲料と比べてその後の体 液バランスの回復、汗腺機能、引き続き行う持久性運動のパフォーマンスと体温調節反応にほと んど影響しないことを示している。

#### 緒言

暑熱環境下で運動を繰り返す際、失った水分を効果的に回復させることが続く運動のパフォーマンスや体温調節に重要となる。これまでの研究で、運動と運動の間で摂取する水分は、その量と成分が重要になると指摘されている(15)。例えば、運動後は失った水分(すなわち発汗量)を補完できる量の飲料を補給する必要があり、それはナトリウム、カリウム、糖質を含む方が好ましい(例:スポーツドリンク)(6,15)。近年では、スポーツドリンクよりも牛乳を摂取することが推奨されている(16,18)。その理由として牛乳に含まれるたんぱく質の役割が指摘されており(8)、中強度の間欠運動を行った後に体重1kgあたり0.18gのたんぱく質を含む飲料を摂取すると血管内外の浸透圧勾配に従い、運動後の血液量の回復が加速する(11)。このような血液量の増加は運動時の熱放散に不可欠な発汗機能を高めると考えられる(2,12)。その理由として、血液量増大に伴い皮膚血流量が増加し、汗腺により多くの血液を供給することで、汗腺がより多くの汗を産生できることが考えられるものの、それは不明である。

前述のようにスポーツ場面で牛乳摂取が推奨されている反面、その方法や効果には課題が多く 残されている。Shirreff et al. (2006) は、暑熱環境下で体重が 1.7%減少するような間欠運動を 行った後、失った水分量の 150% (~2L 程度) に相当する水、スポーツドリンク、牛乳および牛 乳+ナトリウム飲料を摂取すると、牛乳を含む飲料では他の飲料と比較して運動後の尿量が低下 し、体液量回復が加速することを報告している(16)。同様のプロトコルを用いて、Watson et al. (2008) は、運動後の牛乳およびスポーツドリンク摂取の違いは、続く暑熱下運動の持久性 パフォーマンスや体温調節反応に影響しないことを明らかにした(18)。これらの研究では運動後に 2L 程度の牛乳を摂取しており、この方法は乳糖不耐症の割合いが高いアジア人(90-100%)(4) には不向きである。一方、前述のように体重 1kg あたり 0.18g のたんぱく質を含む飲料でも運動 後の血液量回復に効果があり(11)、このたんぱく質量は牛乳換算でおよそ 327ml となる (Table 1 を基に算出)。このことは、多量の牛乳(例:2L)を飲まずとも、コップ $1\sim2$ 杯分の牛乳でも運 動後の体液バランスの回復に効果がある可能性を示している。実際に日本体育協会の熱中症予防 ガイドブックでは、夏の運動後に同量の牛乳摂取を推奨している(20)。それにも関わらず、コップ 1~2 杯の牛乳摂取で本当に運動後の体液バランスの回復が加速するのかどうかは明らかではな い。さらに、このような運動後の牛乳摂取が続く運動時の体温調節反応や運動パフォーマンスに 影響するのかどうかも不明である。

以上の課題より、本研究では、先行研究よりも少ない牛乳摂取量でも①運動後の体液バランス 回復が加速し、②それにより汗腺が作る汗の量(汗腺機能)が向上し、③次に行う運動時の体温 調節反応やパフォーマンスが改善されるかどうかを明らかにする。

### 方 法

### 研究倫理

各被験者には事前に目的、方法および生じうる危険を説明し、書面にて研究参加の同意を得た。 本研究は新潟大学教育学部保健体育学研究倫理審査委員会の承認を得て実施した(2016-19)。

#### 被験者

被験者は日頃から運動習慣のある若年男性 6 名とした。被験者の年齢、身長、体重および自転車運動の最大負荷( $WR_{peak}$ ,後述)はそれぞれ  $23.2\pm3.9$  歳、 $172.2\pm5.1$  cm、 $65.5\pm3.9$  kg および  $277\pm42$  W であった。実験は 2016 年 11 月~12 月に行った。

### 実験手順

本実験に先立ち、自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷運動テストを実施した。室温およそ  $25^{\circ}$  の実験室において、負荷が 50W から開始する漸増負荷運動(20W/分)を疲労困憊に至るまで行った。疲労困憊時の運動負荷を  $WR_{peak}$  とした。

被験者は異なる日程で3回の本実験に参加した。各回の概要を Fig. 1 に示した。被験者は実験室(室温およそ 25℃)に来訪後、ランニングパンツおよびシャツに着替え、半仰臥位姿勢で30分間安静を保持した。その後、採尿、採血、心拍数・血圧・体重測定を行い(BL、Fig. 1)、最大心拍数の60%強度で4分間×8セット(休息5分)の運動を行った(Exercise 1)。Exercise 1の運動強度は先行研究を基に決定した( $^{(11)}$ )。Exercise 1後、半仰臥位姿勢で15分間の休息を挟んで前述した測定を行った後(Post、Fig. 1)、水(Water)、スポーツ飲料(CE、ポカリスエット)もしくは牛乳(Milk、コープ)をBLで測定した体重の5.45g/kg摂取した(Table 1)。飲料摂取後、半仰臥位姿勢でさらに3時間安静を保持した(Fig. 1)。その間、1時間ごとに前述の測定を繰り返した(R1~R2、Fig. 1)。長時間の実験(合計およそ6・7時間)による空腹を避けるため、R1測定後に栄養補助食品1箱(カロリーメイト、大塚製薬社製)とExercise 1後に摂取した飲料と同じものをその1/3摂取した(Table 1)。

R2 測定後、ピロカルピンを用いたイオントフォレーシスを行った。イオントフォレーシスは微弱な電流(例:1.5mA)を皮膚に流し、様々な薬品を経皮的に皮内に投与する方法である。本研究では、発汗を誘発するピロカルピンによる発汗反応から汗腺機能を評価した。1%濃度のピロカルピン(東京化成社製)をガーゼに浸透させ、それを面積2.54cm²の通電用カプセルに詰めた(スキノス技研社製)。ピロカルピン濃度は先行研究を基に決定した(1)。マジックバンドを用いて通電用カプセルを腹側の前腕部に当て、陽極とした。手首には電極用パッド(ロングライフパッド、オムロン社製)を貼り、陰極につなぎ、1.5mAで5分間通電した。通電終了後、通電用カプセルと電極パッドを外し、イオントフォレーシス部位をガーゼでぬぐった後、同部に発汗カプセル(5.3 cm²)をマジックバンドで固定した。発汗カプセル内に空気が循環し、値が安定してから(およそ2分間)、ピロカルピン誘発性発汗量を15分間測定した。また、この近位部の前腕部皮膚温を測定した。

R3 測定後、被験者は食道温センサーを挿入し、皮膚温変化を均一にするため水循環スーツ(アレンバンガード社製)を着用した。スーツ内に循環する湯の温度は 43℃とした。続けて他の測定準備(発汗量、皮膚温、皮膚血流量、血圧)を行った後、5 分間安静を保持してから 60%WR<sub>peak</sub>の自転車運動を継続できなくなるまで行った。

### 測定項目

飲料の成分検査は外部機関に委託して行った(県都食品環境分析センター、Table 1)。心拍数はポラール社製の心拍センサーで測定した(RS800CX)。血圧は聴診法により測定した。体重は体重計で測定した(HBF・252F・W、オムロン社製)。尿量および尿比重(UG・D、アタゴ社製)は実験室近くのトイレで採尿をして測定した。採血は指先の穿刺によって行った。採血 10 分前から  $41^{\circ}$  の湯で手を加温し、アルコール消毒を行った後、無毛部側の指先に穿刺を行った(BD セーフティランセット、ベクトン・ディッキントン社製)。穿刺直後の血液はガーゼでふき取り、続く血液を毛細管(ヘマトクリット毛細管、テルモ社製)およびマイクロキュベット(Hb201+、ヘモキュー社製)で採集した。毛細管は 4000rpm で 10 分間遠心分離し(ヘマトクリット遠心器 3220、クボタ社製)、ヘマトクリット値を測定した。マイクロキュベットの血液からヘモグロビン濃度を測定した(ヘモキューHb201+、ヘモキュー社製)。1 回の測定でそれぞれ 3 サンプル採血し、その平均値から血液量、赤血球量および血漿量を算出した(5)。

食道温および皮膚温(胸、上腕、大腿、下腿)は T 型熱電対を用いて測定した。食道温測定用の熱電対はチューブでカバーし、その先端をシリコンでカバーした。局所皮膚温から平均皮膚温を(13)、食道温および平均皮膚温から平均体温を算出した(17)。発汗量は換気カプセル法を用いて、左前腕部および背部で測定した。自作した発汗カプセル(5.3 cm²)をコロジオン(Collodion、関東化学社製)で皮膚に貼り付け、カプセル内に 1L/min の乾燥窒素ガスを還流させ、カプセル内を通過したガスの温度および湿度を温湿度計(HMP60、Vaisala 社製)で測定し、発汗量を算出した。前腕部の皮膚血流量はレーザー血流計で測定した(FLO-C1、オメガ社製)。得られた値を平均血圧で除し、安静時の値を基準とした相対値で皮膚血管コンダクタンスを算出した。食道温、皮膚温、発汗量および皮膚血流量は1秒ごとの値を記録し(MX100、横河電機社製)、1分間ごとに平均した。心拍数は5秒ごとに測定して、1分間ごとに平均した。血圧は安静時、運動中5分間毎および運動終了直前に測定した。

#### データ解析および統計処理

体重は BL を基準とした変化率( $\Delta$ )を算出した。ヘモグロビンおよびヘマトクリット値は絶対値および Exercise 1 後の値(Post、Fig. 1)を基準とした相対値で評価した。ピロカルピン誘発性発汗反応は発汗測定 15 分間の値を平均した。Exercise 2 における心拍数、食道温、平均皮膚温、平均体温、発汗量および皮膚血流量は、運動前安静 5 分間の平均値を算出し、BL とした。Exercise 2 における運動継続時間の最短は 11 分間であったため、11 分目までの各値および運動終了時における値(End)を算出した。

時間変化に対する各パラメーターの比較には繰り返しのある 2 要因の分散分析を用いた。有意な主効果もしくは相互作用が認められた場合には、Turkey 法あるいは Dunnet 法による多重比較を行った。運動継続時間およびピロカルピン誘発性発汗反応の比較には繰り返しのある 1 要因の

分散分析を用いた。これについては有意な主効果は認められなかったため、多重比較は行っていない。統計処理は全て GraphPad Prism (ver. 6) を用いて行った。データは全て平均 $\pm$ SD で示し、有意水準は P< 0.05 とした。

### 結果

# Exercise 1後の生体反応

Exercise 1 後の体重は R1~3 において運動前と比較して低く推移したが (P<0.05)、この変化は飲料条件間に差は見られなかった (Fig. 2)。Exercise 1 前から R3 までの尿量は変化せず、飲料条件間にも差は認められなかった (Fig. 3)。Exercise 1 後の R3 における尿比重は運動前と比較して有意に低い値を示したが (P<0.05)、飲料条件間に差は認められなかった (Fig. 3)。

へモグロビン濃度およびヘマトクリット値は Exercise 1 前後で変化せず、いずれの時間帯においても飲料条件間に差は認められなかった(Fig. 4)。ヘモグロビン濃度およびヘマトクリット値から計算した血液量、赤血球量、血漿量の絶対値および相対値変化も Exercise 1 前後で変化せず、いずれの時間帯においても飲料条件間に差は認められなかった(Fig. 5)。

### ピロカルピン誘発性発汗反応

R2 後に行ったピロカルピンイオントフォレーシスにより誘発された前腕部の発汗量(ピロカルピン誘発性発汗反応)は飲料条件間で差は認められなかった(Fig. 6)。発汗測定の近位部で測定した前腕部皮膚温にも飲料条件間で差は認められなかった(データ不記載)。

# Exercise 2 における運動継続時間と生体反応

Exercise 2 における運動継続時間は Water、CE、Milk 条件でそれぞれ  $1247 \pm 430$ 、 $1201 \pm 299$  および  $1094 \pm 400$  秒となり、飲料条件間に差はなかった。Fig. 7 に Exercise 2 における心拍数、平均血圧、食道温、平均皮膚温および平均体温の変化を示した。すべてのパラメーターは運動によって増大し、平均皮膚温を除く各反応は飲料条件間で差がなかった(Fig. 7)。運動開始  $1\sim 4$  分目の CE 条件における平均皮膚温は他の 2 条件と比較して低い値を示したが(P<0.05)、運動 5 分目以降には条件間の差は認められなくなった(Fig. 7)。Exercise 2 における前腕・背部発汗量および前腕部皮膚血管コンダクタンスも条件間に差は認められなかった(Fig. 8)。

### 考 察

本研究で得られた主な知見は、先行研究よりも少ない量の牛乳摂取は同量の水やスポーツドリンクと比較して①運動(Exercise 1)後の体液バランスの回復(尿量、尿比重、血液量、赤血球量、血漿量)、②汗腺機能(ピロカルピン誘発性発汗反応)および③続く運動時(Exercise 2)の体温調節反応(発汗量、皮膚血流量、食道温)または持久性パフォーマンス(運動継続時間)に影響しない。

### Exercise 1後の牛乳摂取が運動後の体液バランスに及ぼす影響

本研究では Exercise 1後に体重がおよそ 0.7 kg 減少し (体重の 1%程度の脱水)、運動後にお よそ 480ml (給水 2 回の合計) の水、スポーツドリンク、牛乳を摂取した。これは先行研究(16, 18) で用いられている脱水量(体重の 1.7%)および補給量(脱水量の 150%、2L 程度)よりも少な い摂取量である。先行研究では牛乳を摂取することで水やスポーツドリンクよりも尿量が低下し て、運動後の体液バランスの回復が加速することが報告されている(16,18)。本研究ではいずれの体 液パラメーターでも飲料条件間に差が認められなかったことから、本研究のような比較的少ない 牛乳摂取量では、水やスポーツドリンク条件と比較して、運動後の体液バランスに影響しないと 考えられる。その理由として、いくつかの可能性が考えられる。第1に、緒言でも述べたように、 運動後の給水にはその成分とともに飲む量が重要になることが指摘されている(15)。過度な脱水を 伴う運動後には失った水分量を十分に補完することが給水の前提であり、その上で飲料の成分が 重要になると指摘されており(8)、本研究では飲水量が少なく、飲料成分の効果が認められなかっ た可能性がある。第2に、本研究では飲料とともに間食を用いていた(Fig. 1)。本研究で用いた 間食にはおよそ 11gのたんぱく質が含まれており、これは牛乳における含有量(およそ 13g)と 同程度である。そのため、間食に含まれるたんぱく質の影響によって牛乳の影響が小さくなった 可能性がある。ただし、間食前の尿量にも飲水条件間で差が見られなかったため(Fig. 3)、間食 の影響は小さかったかもしれない。第3に、体液バランスに重要なたんぱく質以外の成分(例: ナトリウム、カリウム、糖質)が結果に影響している可能性もある。本研究で用いた飲料のナト リウム濃度および糖質量は水<スポーツドリンク≒牛乳であったが(Table 1)、各体液パラメー ターには飲料条件間で差が認められなかったことを考えると、ナトリウム濃度と糖質の違いは結 果に影響するほど大きなものではなかったのかもしれない。本研究では飲料のカリウム濃度を測 定していないため、その影響は不明である。

Okazaki et al. (2009) は、本研究の Exercise 1 と同様の間欠運動を行った後に、体重 1kg あたり 0.18g のたんぱく質を含む飲料を摂取すると、運動後の血液量の回復が大きくなることを報告している。本研究で用いた牛乳のたんぱく質量はほぼ Okazaki et al. (2009) の研究と同程度である。それにも関わらず、本研究では牛乳、水およびスポーツドリンクの違いは運動後の体液パラメーター変化に影響しなかった。これらのことは、コップ 1~2 杯程度の牛乳摂取では他の飲料と比べて運動後の体液バランスの回復に有利に働かない可能性を示している。しかし、Okazaki et al. (2009) の研究と知見が一致しない理由は明らかではない。Okazaki et al. (2009) は実際の牛乳ではなく、より成分がコントロールされた実験用の飲料を使用していたため、飲んでいた飲料の違いが結果に影響していたのかもしれない。また、Okazaki et al. (2009) の研究では、被験者の前日の食事から調整をしている。本研究でも実験前日に同じような食事を摂取することを

被験者に推奨していたが、被験者間でコントロールしていたわけではないため、結果が不明瞭になったのかもしれない。実際に、統計的な差ではないものの、Exercise 1 前の尿比重は飲料条件間で違いがあった(つまり、各日によって運動前の体水分量が違っていた可能性がある、Fig. 3)。 先行研究のように高度に実験的な環境ではなく、本研究のように比較的日常生活に近い実験環境においては、コップ  $1\sim2$  杯程度の牛乳摂取は運動後の体液バランスの改善に影響しないのかもしれない。

### Exercise 1後の牛乳摂取が汗腺機能に及ぼす影響

Exercise 1 終了 2 時間後に評価したピロカルピン誘発性発汗反応は、運動後に摂取した飲料の違いを受けなかった(Fig. 6)。このことから、本研究で用いた飲料条件の違いは運動後の汗腺機能には影響しないと考えられる。これまでの先行研究で、血液量レベルが発汗反応に影響する可能性が示唆されている(2,12)。また、運動時の血液量増加で皮膚血流量が増大する(10)。さらに、前腕部の血流量を阻害すると前腕部の発汗量が低下したり(14)、局所的に汗腺周囲の皮膚血流量を顕著に減少させると温熱負荷時の発汗反応が減弱する(19)。これらのことから、もし牛乳摂取で運動後の血液量の増大が起こるとすると、血液量増大→皮膚血流量増大→汗腺に供給される血液量の増加を介して、ピロカルピン誘発性発汗反応が大きくなる可能性が考えられる。しかし、本研究では運動直後の牛乳摂取は他の飲料と比較して血液量の増大を引き起こさなかったことから(Fig. 5)、ピロカルピン誘発性発汗反応にも影響しなかったと考えられる。一方、近年の研究で、生理的範囲内で起こる皮膚血流量の増減は発汗反応に影響しないことが示されている(3)。そのため、牛乳摂取によって運動後の血液量増大がもし起こったとしても、汗腺機能に対する効果はあまり大きくない可能性も考えられ、今後の検討が必要である。

## Exercise 1後の牛乳摂取が続く Exercise 2のパフォーマンスと体温調節反応に及ぼす影響

本研究では Exercise 1 後に行う運動(Exercise 2)の継続時間は、水、スポーツドリンク、牛乳間で同程度であった。このことから、本研究の飲料条件下においては、飲料条件の違いは 2 回目に行う持久性運動のパフォーマンスに影響しないと考えられる。本研究では暑熱環境を模した実験条件として、温水が流れる水循環スーツを着用して Exercise 2 を実施した。暑熱環境下の持久性運動時には深部体温上昇や中枢性疲労など、様々な要因がパフォーマンスを低下させる(7,9)。1 回目の運動後の牛乳摂取でもし血液量が増大すると、2 回目に行う暑熱下の運動パフォーマンスが改善する可能性が考えられるが、本研究の血液パラメーターは飲料条件の違いの影響を受けていなかった(Fig. 5)。そのため、Exercise 2 における運動継続時間は飲料条件の影響を受けなかったのかもしれない。

Exercise 2 における運動時の心拍数、平均血圧、食道温、平均体温、発汗量および皮膚血流量は飲料条件の影響を受けなかった。一方、運動開始初期の平均皮膚温はスポーツドリンク条件で他の飲料条件よりも有意な低値を示した(Fig. 7)。しかし、このような変化が認められた理由は明らかではない。運動時の皮膚温は皮膚血流量や発汗量に影響されるが、本研究で測定した部位における各反応は飲料条件間で差がなかった(Fig. 8)。いずれにせよ、運動 5 分目以降には皮膚温の差は消失していたこと、平均体温で比較すると飲料条件間に差がなかったことを考慮すると、運動初期に飲料条件間で認められた平均皮膚温の違いは、運動時の体温調節に大きくは影響して

いなかったと推察される。運動後の飲料摂取の違いが皮膚温に及ぼす影響には、さらなる検討が必要である。

# スポーツ現場への還元と今後の課題

日本体育協会の熱中症予防ガイドブックでは、運動後にコップ 1~2 杯の牛乳摂取が推奨されている(20)。これは様々な科学的エビデンスを基に提唱されていると考えられる(11,16,18)。しかし、本研究で得られた結果を考慮すると、どの程度の量の牛乳を飲めば体液バランス、汗腺機能、続く運動時の体温調節やパフォーマンスへの効果が顕在化するのかはまだ不明な点が残されている。これは、多量の牛乳を飲むことができないアジア人にとって重要な問題である(例:乳糖不耐症)。運動後に牛乳を多量に飲んだ場合には体液バランスに関して明らかな効果がある(8)。そのため、今後の研究をさらに進め、スポーツ現場における牛乳摂取のガイドライン(適切な量、タイミング、温度、牛乳の種類など)を作成し、広く啓蒙することがスポーツ現場における熱中症予防に重要だと考えられる。

### 結 論

運動直後に摂取する少量の牛乳(合計 480ml 程度)では、同量の水やスポーツドリンクと比較して運動後の体液バランスおよび汗腺機能に影響しない。また、このような運動後の牛乳摂取は続く暑熱環境を模した持久性運動のパフォーマンスおよび体温調節反応に大きく影響しない。

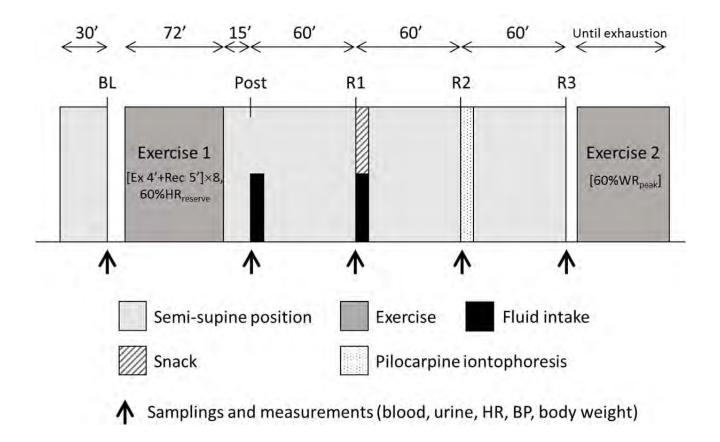
## 参考文献

- Buono MJ, Numan TR, Claros RM, Brodine SK, and Kolkhorst FW. Is active sweating during heat acclimation required for improvements in peripheral sweat gland function? Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 297: R1082-1085, 2009.
- 2. **Convertino VA**. Heart rate and sweat rate responses associated with exercise-induced hypervolemia. *Med Sci Sports Exerc* 15: 77-82, 1983.
- 3. **Cramer MN, Gagnon D, Crandall CG, and Jay O**. Does attenuated skin blood flow lower sweat rate and the critical environmental limit for heat balance during severe heat exposure? *Exp Physiol* 2016.
- 4. de Vrese M, Stegelmann A, Richter B, Fenselau S, Laue C, and Schrezenmeir J. Probiotics-compensation for lactase insufficiency. *Am J Clin Nutr* 73: 421S-429S, 2001.
- 5. **Dill D, and Costill DL**. Calculation of percentage changes in volumes of blood, plasma, and red cells in dehydration. *J Appl Physiol* 37: 247-248, 1974.
- 6. **Evans GH, Shirreffs SM, and Maughan RJ**. Postexercise rehydration in man: the effects of osmolality and carbohydrate content of ingested drinks. *Nutrition* 25: 905-913, 2009.
- 7. Gonzalez-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, and Nielsen B. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 86: 1032-1039, 1999.
- 8. **James L**. Milk protein and the restoration of fluid balance after exercise. In: *Acute Topics in Sport Nutrition*Karger Publishers, 2012, p. 120-126.
- 9. **Noakes TDO**. Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis. *Frontiers in Physiology* 3: 82, 2012.
- 10. **Nose H, Mack GW, Shi XR, Morimoto K, and Nadel ER**. Effect of saline infusion during exercise on thermal and circulatory regulations. *J Appl Physiol* 69: 609-616, 1990.
- 11. Okazaki K, Hayase H, Ichinose T, Mitono H, Doi T, and Nose H. Protein and carbohydrate supplementation after exercise increases plasma volume and albumin content in older and young men. *J Appl Physiol* 107: 770-779, 2009.
- 12. Okazaki K, Kamijo YI, Takeno Y, Okumoto T, Masuki S, and Nose H. Effects of exercise training on thermoregulatory responses and blood volume in older men. J Appl Physiol 93: 1630-1637, 2002.
- 13. **Ramanathan NL**. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *J Appl Physiol* 19: 531-533, 1964.
- 14. **Randall WC, Deering R, and Dougherty I**. Reflex sweating and the inhibition of sweating by prolonged arterial occlusion. *JAppl Physiol* 1: 53-59, 1948.
- 15. Shirreffs SM, Armstrong LE, and Cheuvront SN. Fluid and electrolyte needs for preparation and recovery from training and competition. *J Sports Sci* 22: 57-63, 2004.
- 16. **Shirreffs SM, Watson P, and Maughan RJ**. Milk as an effective post-exercise rehydration drink. *Br J Nutr* 98: 173-180, 2007.
- 17. Stolwijk JA, and Hardy JD. Partitional calorimetric studies of responses of man to

- thermal transients. JAppl Physiol 21: 967-977, 1966.
- 18. **Watson P, Love TD, Maughan RJ, and Shirreffs SM**. A comparison of the effects of milk and a carbohydrate-electrolyte drink on the restoration of fluid balance and exercise capacity in a hot, humid environment. *Eur J Appl Physiol* 104: 633-642, 2008.
- 19. Wingo JE, Low DA, Keller DM, Brothers RM, Shibasaki M, and Crandall CG. Skin blood flow and local temperature independently modify sweat rate during passive heat stress in humans. *JAppl Physiol* 109: 1301-1306, 2010.
- 20. 日本体育協会. 熱中症予防ガイドブック. 2013.

 $\textbf{Table 1} \ \textbf{Nutritional composition in water, carbohydrate-electrolyte sports drink (CE), milk, and snack in the present study. Values were per 100ml each fluid. \\$ 

|                  | Water | CE    | Milk  | Snack  |
|------------------|-------|-------|-------|--------|
| Calorie (kcal)   | 0     | 24    | 70    | 500    |
| Carbohydrate (g) | 0     | 6. 1  | 5. 1  | 52. 5  |
| Fat (g)          | 0     | < 0.1 | 3.9   | 28     |
| Protein (g)      | 0     | < 0.1 | 3.4   | 10.875 |
| Sodium (mg)      | 1. 1  | 39    | 43    | 400    |
| Water (g)        | 100.0 | 95. 6 | 89. 3 |        |



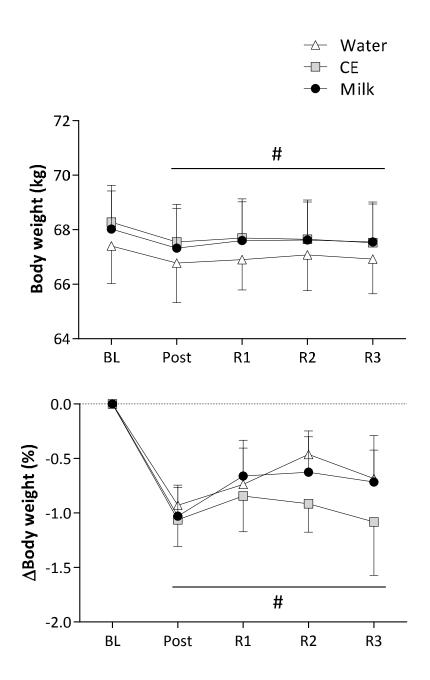
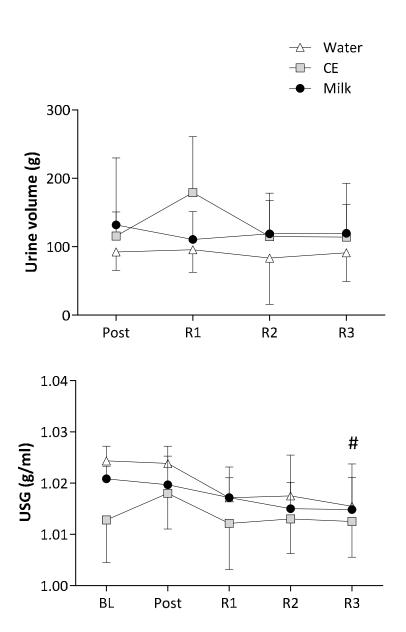


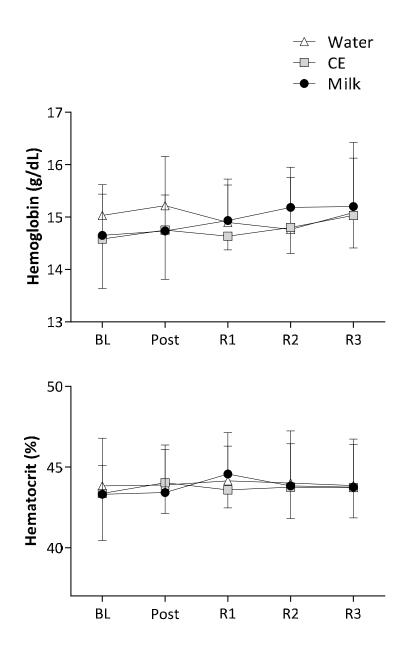
Figure 2 Absolute and relative changes in body weight after the first exercise (Exercise 1 in Fig. 1). CE, carbohydrate-electrolyte sports drink. BL, baseline. R, rest.

#, vs. BL for all fluid conditions (P < 0.05).



**Figure 3** Urine volume and urine specific gravity (USG) after the first exercise (Exercise 1 in Fig. 1). CE, carbohydrate-electrolyte sports drink. BL, baseline. R, rest.

#, vs. BL for all fluid conditions (P < 0.05).



**Figure 4** Hemoglobin concentration and hematocrit after the first exercise (Exercise 1 in Fig. 1). CE, carbohydrate-electrolyte sports drink. BL, baseline. R, rest.

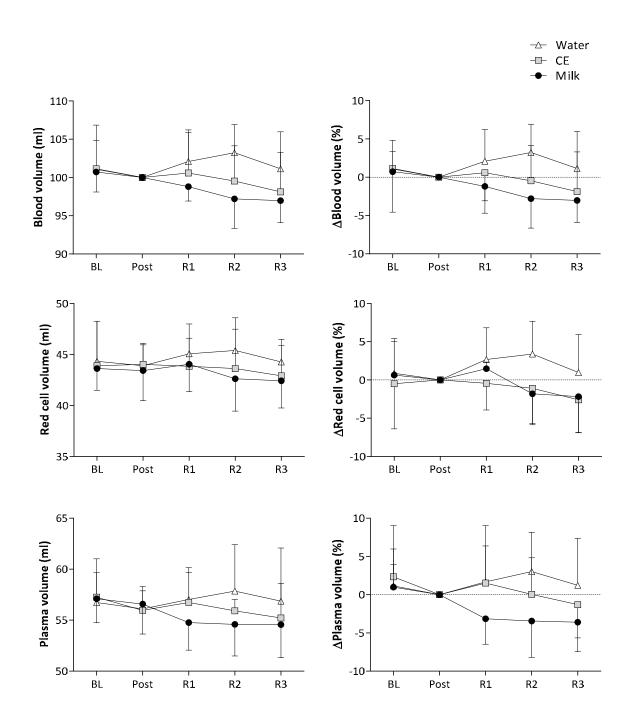


Figure 5 Absolute and relative changes in blood volume, red cell volume, and plasma volume after the first exercise (Exercise 1 in Fig. 1). CE, carbohydrate-electrolyte sports drink. BL, baseline. R, rest.

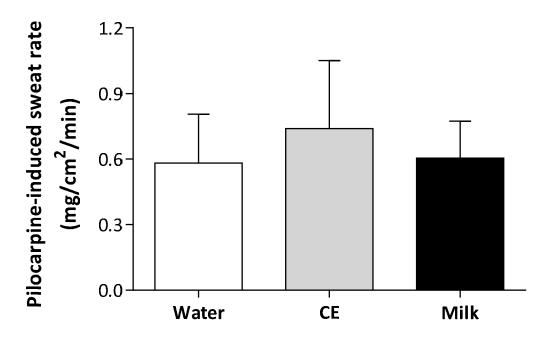


Figure 6 Pilocarpine-induced sweat rate on forearm. CE, carbohydrate-electrolyte sports drink.

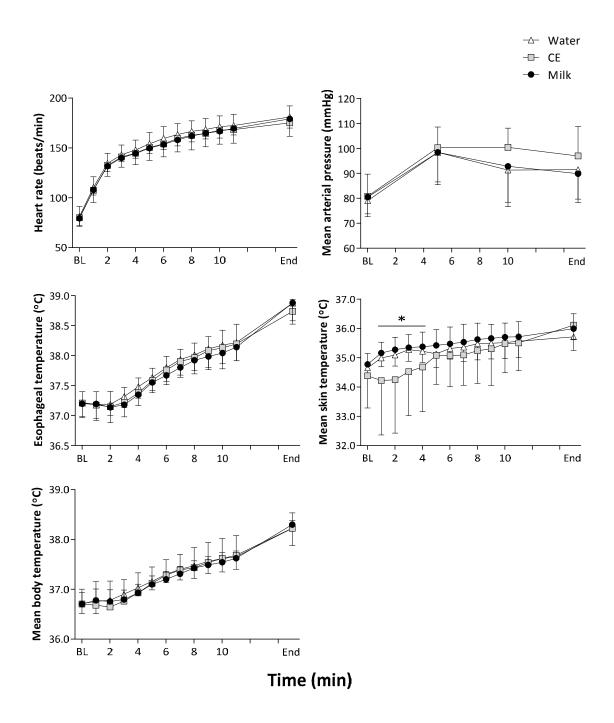
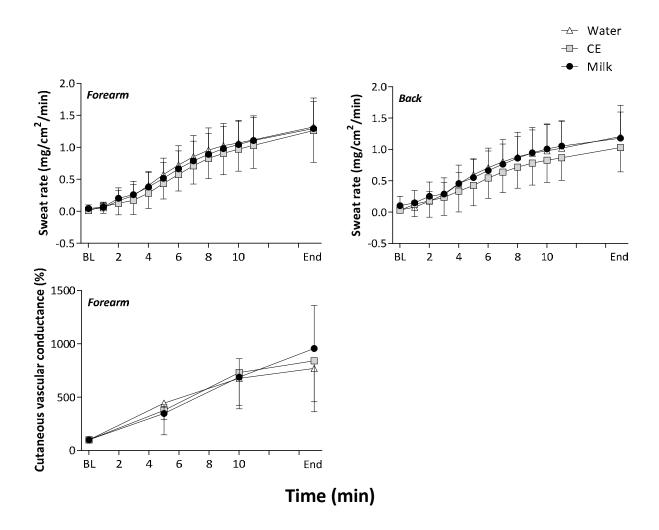


Figure 7 Heart rate, mean arterial pressure, esophageal temperature, mean skin temperature, and mean body temperature during the second exercise (Exercise 2 in Fig. 1). CE, carbohydrate-electrolyte sports drink. BL, baseline.

\*, Water and Milk > CE (P < 0.05).



**Figure 8** Sweat rates on forearm and back and cutaneous vascular conductance on forearm during the second exercise (Exercise 2 in Fig. 1). CE, carbohydrate-electrolyte sports drink. BL, baseline.