

## 短期間暑熱馴化中におけるアイススラリー摂取が生体負担度 および持久的運動能力に及ぼす影響

内藤貴司<sup>1</sup>, 村石光二<sup>2</sup>, 下山寛之<sup>1,3</sup>, 高橋英幸<sup>1</sup>

1: 国立スポーツ科学センター

2: 日本スポーツ振興センター

3: 日本学術振興会特別研究員

### 1. 緒言

暑熱環境が運動能力を低下させることは、学術分野のみならず競技現場でも非常によく知られている。第32回オリンピック競技大会(2020/東京)は暑熱環境下で行われることが明白であり、暑熱下での運動能力低下の抑制ならびに暑熱対策が大きな課題となっている。この運動能力低下の抑制や暑熱対策を成し遂げるために、様々な方略が検討されている(内藤・大柿, 2015)。代表的なものとして、「身体冷却」や「暑熱馴化」が挙げられる。

近年、身体冷却はアイススラリーの摂取を用いた方法が盛んに検討されている。アイススラリーは、水と微小な氷が混ざった懸濁液と定義されている(内藤・大柿, 2015)。アイススラリー摂取は運動前であれば深部体温を低下させ(Siegel et al., 2010; Naito et al., 2017)、運動中であれば深部体温の上昇を抑制し(Stevens et al., 2013)、持久的運動能力の低下を抑制する。また、この持久的運動能力低下の抑制はアイススラリー摂取によって消化管にある温度受容器が刺激され、主観的感覚を改善することや(Burdon et al., 2013)、脳内温度を低下させることが関係している可能性が示唆されている(Onitsuka et al., 2018)。これらの先行研究の結果から、アイススラリーの摂取は暑熱下での持久的運動能力低下の抑制に有用であると考えられている。

一方で実際のスポーツ競技現場では、暑熱下で練習や競技会が日々行われている。このような暑熱下で運動を継続して行くと、身体への熱負荷を軽減するような生理的適応(暑熱馴化)が生じる。例えば暑熱馴化トレーニングを行うと、トレーニング開始後の3日目前後から発汗量の増加、心拍数や深部体温上昇度の低下が認められている(Lind and Bass, 1963)。したがって、競技者は夏季になると練習や競技会を重ね、不随意的に数日かけて暑熱馴化する。この数日間程度の暑熱馴化中のアイススラリーを用いた身体冷却は持久的運動能力低下の抑制、つまり運動量の確保が見込めるため、有用である可能性がある。しかしながら、暑熱馴化中に冷却介入を行うと深部体温の上昇が抑制されるため、体温上昇に付随して引き起こされる熱放散能の改善がみられない可能性も考えられる。したがって、夏季のトレーニング(暑熱馴化)中に冷却介入を行い、運動量を担保すべきか、または冷却介入を行わずに熱放散能の獲得を優先すべきか科学的根拠を示す必要がある。これまで暑熱馴化中の身体冷却に着目した研究はなく、冷却介入法の一つであり、近年注目されているアイススラリー法を用いた際の生理的反応や適応を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、短期的な暑熱馴化中におけるアイススラリー摂取が生体負担度および持久的運動能力に及ぼす影響を検討することを目的とした。

### 2. 方法

#### 2.1 被験者

本研究の被験者は、運動習慣を有する健康成人男性7名であった。これらの被験者に、既往歴

や投薬中の者は含まれていなかった。被験者には実験前日から実験最終日まで激しい運動やアルコール、カフェインや栄養のサプリメントの摂取を控えるように求めた。被験者には本研究の目的、方法、危険性等を十分に口頭で説明し、書面による同意を得た。本研究は、国立スポーツ科学センターの倫理審査委員会の承認 (2018-007) を得て実施した。

## 2.2 実験デザイン

本研究の実施期間は季節馴化の要因を除外して実施するために、11～2月とした。また、全ての実験は室温 36℃、相対湿度 50%に調節された人工気象室内で実施された。本実験は連続した9日間で行われ、1および9日目に多段階漸増負荷テスト、2および8日目に休息、3～7日目に暑熱馴化トレーニングが設定された (Figure 1)。本研究は、暑熱馴化トレーニングの運動間休息中に 1) スポーツ飲料で作成されたアイススラリー (-1℃)、もしくは 2) 室温のスポーツ飲料 (36℃) を摂取する2試行をクロスオーバーで実施した。また、短期間の暑熱馴化トレーニングの影響は1週間経過後に消失する (Garrett et al., 2009) ことから、2試行目は2週間以上間隔を空けて実施した。

## 2.3 多段階漸増負荷テスト

多段階漸増負荷テストは自転車エルゴメーター (風神雷神, OC LABO) を用いて第1ステージの 30 W から3分毎に 30 W ずつ負荷を漸増させ、血中乳酸濃度が 4.0 mmol/l を超えるまで運動を実施した。血中乳酸濃度はテスト開始前および各ステージの開始2分30秒後に指尖から採血し、血中乳酸濃度分析機 (Lactate pro 2, アークレイ) を用いて分析した。血中乳酸濃度が 4.0 mmol/l を超えたステージを完遂後、3分間休息を取った。その後、血中乳酸濃度が 4.0 mmol/l を超えたステージよりも 30 W 低い負荷から再スタートし、1分毎に 20 W ずつ負荷を漸増させ疲労困憊まで運動させた。疲労困憊は 1) 酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) がプラトーになる、2) 呼吸交換比が 1.10 以上、3) 心拍数が年齢から推定される最大心拍数 (220-年齢) に達しているうち、いずれか2つを満たしている場合とした。多段階漸増負荷テストにおいて、連続する1分間の  $\dot{V}O_2$  の最高値を最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) として採用した。また、 $\dot{V}O_{2max}$  時の負荷 (Watt at  $\dot{V}O_{2max}$ :  $w\dot{V}O_{2max}$ ) は多段階漸増負荷テストにおける各負荷の  $\dot{V}O_2$  と Watt の関係性から回帰直線を求め、 $\dot{V}O_{2max}$  時の Watt が算出された。

$\dot{V}O_2$  は、実験前後に2種類の校正ガス (大気相当:  $O_2$  20.67,  $CO_2$  0.03,  $N_2$  Balance, 呼気相当:  $O_2$  15.03,  $CO_2$  5.02,  $N_2$  Balance) によって校正された自動呼気ガス分析機 (AE-310-s, ミナト医科学) の breath-by-breath モードを用いて連続的に分析した。心拍数は、ハートレートモニタ (RS-800, Polar) を用いて連続的に測定した。

また、Lactate analysis software (Lactate-E ver.2) によって 4.0 mmol/l 時の自転車エルゴメーターの負荷 (LTWatt) を算出した。

## 2.4 暑熱馴化トレーニング

暑熱馴化トレーニングは連続した5日間で日内変動を考慮し、全て同時刻から実施した。被験者は実験室に到着後、半袖シャツと短パンに着替え、採尿および裸体重を測定した。その後、直腸温測定のために専用のゴムカバーを装着した体腔挿入型プローブ (ITP010-11, 日機装サーモ) に潤滑ゼリーを塗り、肛門から直腸内に 15 cm 挿入した。また、皮膚温測定のために前額部、胸

部、上腕部および大腿部にボタン型温度記録計 (サーモクロン SL, KN Laboratory) を装着した。加えて、心拍数測定のために胸部にハートレートモニタを装着し、汗中  $\text{Na}^+$  濃度 (Sweat sodium concentration) を測定するため、右側胸部を滅菌されたガーゼ (7.5 cm×7.5 cm) と防水性のあるテープで覆った。その後、被験者は自転車専用のシューズに履き替え (SH-PR100, Shimano) 人工気象室に入室した。

被験者は自転車エルゴメーターに乗車後、5 分間安静をとった。その後、体重の 7.5% 負荷の全力ペダリングを 5 秒、無負荷のペダリングを 25 秒および 30 秒の安静を 1 セットとし、5 セット終了ごとに 1 分間の休息を挟みながら、計 60 セット実施した。また、被験者は 30 セット終了後に 10 分間の休息 (ハーフタイム) をとった。被験者は、休息中に体重 1 kg 当たり 1.25 g のアイススラリー (-1°C: ICE) もしくは室温のスポーツ飲料 (36°C: CON, ポカリスエット, 大塚製薬) を摂取した。加えて、ハーフタイム中は体重 1 kg 当たり 7.5 g の同様の飲料を摂取した。アイススラリーはスポーツ飲料を専用の機械 (Big biz1, FMI) に投入して、作成した。

自転車運動完遂後、被験者は汗を十分に拭き取り、発汗が停止してから裸体重の測定および採尿を行なった。

## 2.5 測定項目および解析

裸体重は体重計 (HW-100KGV, A&D), 尿比重はデジタル尿比重屈折計 (PAL-09S, アタゴ) を用いて安静時と運動終了後に測定した。心拍数は実験を通して、ハートレートモニタに 1 分毎に記録した。直腸温 (Tre) は実験を通して、1 分毎にデータロガー (N542R, 日機装サーモ) に記録した。前額部温 (Thead), 胸部温 (Tchest), 上腕部温 (Tarm) および大腿部温 (Thigh) はボタン型温度記録計に 1 分毎に記録した。平均皮膚温 (Tsk) は, Roberts et al. (1977) の 3 点法による  $[Tsk = 0.43 (Tchest) + 0.25 (Tarm) + 0.32 (Thigh)]$  から算出した。暑熱馴化トレーニング中の熱負荷は, Moran et al. (1998) の Physiological strain index (PSI: 以下, 生体負担度)  $[生体負担度 = 5(Tret - Tre0) \cdot (39.5 - Tre0) + 5(HRt - HR0) \cdot (180 - HR0)]$  を用いて算出した。Tre0 および HR0 は測定開始時の直腸温および心拍数であり, Tret および HRt には 5 セット毎の値をそれぞれ代入して, 算出した。算出値の評価法は 0 が無負荷, 10 が非常に高い負荷を示している (Moran et al., 1998)。総発汗量は,  $[運動前体重 - 運動後体重 + 飲料摂取量]$  で算出した。汗中  $\text{Na}^+$  濃度は, 携帯型コンパクトイオンメータ (HORIBA B-722  $\text{Na}^+$  analyzer, HORIBA) を用いて測定した。自転車運動の仕事量は, 各セット毎における全力ペダリングの平均パワー (Mean power output: MPO) およびセットの平均最大パワー (Mean peak power output: MPPO), 総仕事量 (Total work done) を記録した。

## 2.6 統計処理

結果は, 全て平均値±標準偏差値で示した。全ての統計処理は, SPSS のバージョン 23 (Statistical package for social science, IBM) を用いて行った。データはスポーツ飲料 (CON) あるいはアイススラリー試行 (ICE), トレーニング開始時期 (1 日目) とトレーニング終了時期 (5 日目) を反復測定 2 要因 (試行×時間) 分散分析を用いて比較した。有意な交互作用が認められた場合には, 単純主効果の検定を Bonferroni 測定を用いて行った。有意水準は全て 5%未満とした。

## 3. 結果

全ての被験者が, 2 試行の暑熱馴化トレーニングおよびその前後に実施した多段階漸増負荷テ

ストを完遂した。各試行での飲料の総摂取量は同量であり、5セット毎の休息における摂取量は  $86 \pm 12$  g、ハーフタイムの摂取量は  $518 \pm 72$  g であった。

### 3.1 多段階漸増負荷テスト

Table 1 に各試行におけるトレーニング前後の  $\dot{V}O_{2\max}$ 、LTwatt および  $w\dot{V}O_{2\max}$  を示した。 $\dot{V}O_{2\max}$  はトレーニング前後において両試行ともに上昇したが ( $P < 0.05$ )、試行間に差は認められなかった。LTwatt は、トレーニング前後および試行間で差はなかった。 $w\dot{V}O_{2\max}$  は、ICE においてトレーニング前後で上昇したが ( $P < 0.05$ )、CON では有意な差は認められなかった。

### 3.2 体水分状態

各試行における運動前後の体重変化量、総発汗量および汗中の  $Na^+$ 濃度は Table 2 に示した。CON における汗中の  $Na^+$ 濃度は day 1 に比べ day 5 で有意に低く ( $P < 0.05$ )、総発汗量は低値傾向 ( $P < 0.10$ ) を示した。運動前後の体重変化量や ICE における総発汗量および汗中の  $Na^+$ 濃度は、有意な差が認められなかった。

### 3.3 体温調節応答

Figure 2 に各試行の day 1 および day 5 における直腸温の動態を 5 セット毎に示した。ICE day 1 の直腸温は 50 set から運動終了時まで CON day 1 と比べて、安静時から運動終了時まで ICE day 5 と比べて有意に低値を示した ( $P < 0.05$ )。ICE day 5 の直腸温は 40 set 以降から運動終了時まで、CON day 5 と比較して有意に低い値を示した ( $P < 0.05$ )。直腸温の変化率および運動終了時の直腸温は、day 1 および day 5 において試行間で有意な差が認められた ( $P < 0.05$ , Table 3)。38.5°C までの到達時間は各試行ともに day 1 の方が day 5 よりも有意に早く到達し、day 5 では CON が ICE よりも早期に到達した ( $P < 0.05$ , Table 3)。

Figure 3 に各試行の day 1 および day 5 における平均皮膚温および前額部皮膚温の動態を 5 セット毎に示した。ICE day 1 の平均皮膚温はハーフタイムから運動終了時まで CON day 1 と比べて、安静時および 5 set まで ICE day 5 と比べて有意に高値を示した ( $P < 0.05$ )。また、ICE day 5 は CON day 5 と比較して 5 set から運動終了時まで有意に低値を示した ( $P < 0.05$ )。

### 3.4 生体負担度および心拍数

各試行の day 1 および day 5 における生体負担度 (PSI) の経時的変化を Figure 4 に示した。ICE day 1 の PSI は 45 set から運動終了時まで CON day 1 と比べて、ICE day 5 の PSI は 35 set から運動終了時まで CON day 5 と比べてそれぞれ有意に低値を示した ( $P < 0.05$ )。

心拍数は、試行間およびトレーニング期間に関係なく有意な差は認められなかった。

### 3.5 仕事量

各試行の day 1 および day 5 におけるセット毎の全力ペダリング平均パワー (MPO) は Figure 5 に、平均最大パワー (MPPO) および総仕事量は Table 4 に示した。全力ペダリング平均パワーおよび平均最大パワーは各試行ともにトレーニングによって上昇したが ( $P < 0.05$ )、試行間で有意な差は認められなかった。総仕事量は各試行ともにトレーニングによって上昇し ( $P < 0.05$ )、ICE は day 1 および day 5 において CON と比較して有意に高い仕事量であった ( $P < 0.05$ )。

#### 4. 考察

本研究では暑熱馴化トレーニング中に冷却介入を行い、運動量を多くした場合と冷却を行わずに熱放散能を向上させた場合で、持久的運動能力および生体負担度に違いがあるかどうかを2つの試行から検討した。冷却介入は、近年冷却効果が高いと報告されているアイススラリー摂取を用いて実施した。アイススラリーは多くの先行研究 (Naito & Ogaki, 2016) において体重 1 kg 当たり 1.25 g ずつ摂取させているため、本研究もこれに準拠した。本研究から得られた主な知見は、暑熱馴化トレーニング中の冷却 (ICE) は①トレーニング前後で比較し  $\dot{V}O_2\text{max}$  を向上させた。また、ICE における day 5 は day 1 に比べ②トレーニング時の直腸温の上昇を抑制した。③生体負担度は、トレーニング日数に関わらず ICE の方が CON よりも上昇を抑制した。一方で、CON における day 5 は day 1 よりも④総発汗量が増加し、汗中の  $\text{Na}^+$  は低下した。

暑熱環境下で運動を実施すると過度な発汗に伴い、体重は減少し、尿比重の値は増加する。体重の減少量や尿比重の値は脱水の指標として用いられているが、総摂取量と運動の前後体重から算出した体重の変化量や尿比重は、試行および日にち間で有意な差はなかった。また、これらの値は正常の範囲内に保たれた (Sawka et al., 2007)。本研究では、アイススラリーもしくは室温と同温のスポーツ飲料を1回のトレーニングで約 1400 g 摂取したが、体重の変化量は同程度であったため、この総摂取量は適量であったと考えられる。

本研究では、ICE および CON の両試行において  $\dot{V}O_2\text{max}$  は暑熱馴化トレーニング後に向上し、ICE では  $\dot{V}O_2\text{max}$  も上昇した (Table 1)。これまでの暑熱馴化トレーニングの運動プロトコルは、定常負荷運動が多く用いられてきた (Neal et al., 2016)。Garrett et al. (2014) は直腸温が 38.5°C を Modest hyperthermia (適高体温) と呼び、直腸温を上昇させ、この温度を維持できる運動強度でトレーニングをすることが適していると示唆している。実際に、Lorenzo et al. (2010) は10日間のこのプロトコルを用いた暑熱馴化トレーニングで  $\dot{V}O_2\text{max}$  が向上したことを報告している。一方で、高強度のスプリントトレーニング、インターバルトレーニング (Helgerud et al., 2007) や反復トレーニング (Lee et al., 2017) は  $\dot{V}O_2\text{max}$  を向上させることが多く報告されている。これまでの研究では高強度スプリントトレーニングは暑熱馴化トレーニングで用いられておらず、本研究において初めて暑熱環境下でもこれらのトレーニングが有用性である可能性を見出した。アイススラリー摂取による暑熱馴化トレーニング中の身体冷却 (ICE) は冷却を実施しない場合 (CON) よりも、スプリントの総仕事量を高く保つことができ (Table 3)、トレーニング後の  $\dot{V}O_2\text{max}$  の上昇に寄与したものと考えられる。

アイススラリー摂取による運動中の冷却は、運動後半時の直腸温の上昇を抑制することが報告されている (Naito et al., 2018)。本研究の結果はこの先行研究と一致し、ICE day 1 および day 5 は CON day 1 および day 5 に比べて運動の後半時に直腸温の上昇の抑制がみられた (Figure 2)。この直腸温の上昇の抑制が、スプリントの総仕事量を高く保つことができた要因の一つであると考えられる。一方で、ICE day 5 の直腸温は ICE day 1 よりも全ての時点において有意に低い値を示した。この直腸温の差は、安静時の値が関係していると考えられる。安静時の深部体温は暑熱馴化トレーニングによって低下することが数多く報告されており (Castle et al., 2011)、安静時から直腸温が低かったため、トレーニング中もその影響が持続したと考えられる。暑熱馴化トレーニング中にアイススラリー摂取による身体冷却を行っても、安静時の深部体温を低下させる暑熱馴化の効果を獲得できることが示唆された。

本研究における平均心拍数は、試行間およびトレーニング期間で有意な差は認められなかった。先行研究において、トレーニング前後での平均心拍数の低下が報告されているが (Schleh et al., 2018), 定常負荷での検討であった。本研究では高強度反復スプリントを用い, MPPO はトレーニング初日と比較して最終日で両試行ともに上昇した (Table 4)。したがって、トレーニングの運動強度が高まったことにより、暑熱馴化で獲得される心拍数の低下を打ち消してしまったため有意な差は認められなかった可能性が考えられる。一方で、心拍数と直腸温から算出される生体負担度は ICE においてトレーニング時点に関係なく、運動の後半時に上昇が抑制された (Figure 4)。Buller et al. (2008) はこの生体負担度は熱負荷の指標として有用であることを示し、生体負担度の値を 7.5 以上で "at risk" (危険に曝されている) と分類している。本研究における生体負担度はトレーニング期間に関係なく CON では "at risk" に到達した、一方で ICE では到達しなかった。したがって、ICE では生体負担度の上昇が抑制され、危険域での運動を避けたことがスプリントの総仕事量の増加に寄与した可能性が考えられる。

暑熱馴化における熱放散機能の向上は、多くの研究で報告されている (Tyler et al., 2016)。特に、発汗率や汗中  $\text{Na}^+$ 濃度は暑熱馴化トレーニングに大きく影響され、発汗量は亢進し、汗中  $\text{Na}^+$ 濃度は低下する (Neal et al., 2016)。先行研究では適高体温を保ちながら運動を実施する暑熱馴化トレーニングが用いられているが、本研究の高強度の反復スプリントトレーニングにおいても先行研究と同様に、CON において発汗量の増加や汗中  $\text{Na}^+$ 濃度の低下がみられた。先行研究では直腸温が  $38.5^{\circ}\text{C}$  に調節されながら運動を行っているが、本研究においても運動を継続していくと直腸温が  $38.5^{\circ}\text{C}$  に到達した。しかし、到達時間は冷却介入によって異なり、トレーニング中に冷却介入を行うとより遅延することが明らかとなった (Table 3)。また、発汗開始後に深部体温が上昇すればするほど発汗量は増大する、と多くの研究で報告されている (Benzinger, 1969)。これらをまとめると、本研究における CON の発汗量の増大は高体温の暴露時間が影響し、より長い時間の高体温暴露が汗腺機能を刺激したためであると考えられる。加えて、汗中  $\text{Na}^+$ 濃度の差 (Table 2) も、高体温、特に皮膚温の影響が考えられる。汗中  $\text{Na}^+$ 濃度はアルドステロンによって影響を受け、アルドステロンが増加すると  $\text{Na}^+$ の再吸収がより大きくなる (Moreira et al., 1945)。また、高皮膚温下での運動はアルドステロンに対する汗腺の感受性を亢進させる可能性が示唆されている (Shamsuddin et al., 2005)。本研究において、アルドステロンは測定していないが、CON におけるトレーニングは ICE よりも高い皮膚温で行なわれていたため (Figure 3)、アルドステロンもしくは汗腺のそれに対する感受性に影響を及ぼし、汗中  $\text{Na}^+$ 濃度の低下に寄与したと推察される。したがって、暑熱馴化の重要な効果である発汗量の増加や汗中  $\text{Na}^+$ 濃度の低下は高体温が重要な要因であると考えられる。

## 5. 結語

本研究におけるアイスラリー摂取を伴う短期暑熱馴化トレーニングは冷却によって生体負担度は低減し、持続的運動能力を向上させる。一方で、暑熱馴化の重要な効果の一つである発汗量や汗中  $\text{Na}^+$ 濃度は影響されないことが明らかとなった。したがって、短期暑熱馴化トレーニング中の冷却はトレーニング効果はあるが、熱放散機能を向上させることができないため、トレーニングプランに合わせて冷却を選択することが重要であることが示唆された。

## 謝辞

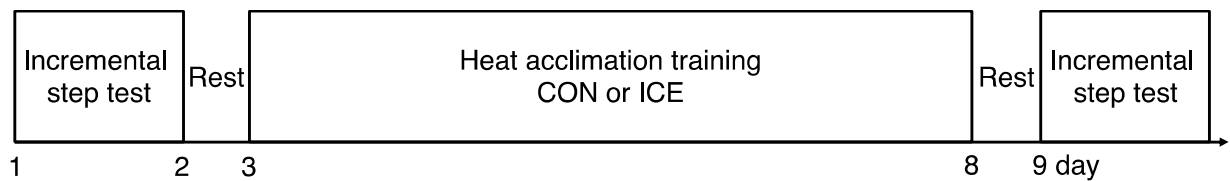
本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人ミズノスポーツ振興財団に厚く御礼を申し上げます。

#### 参考文献

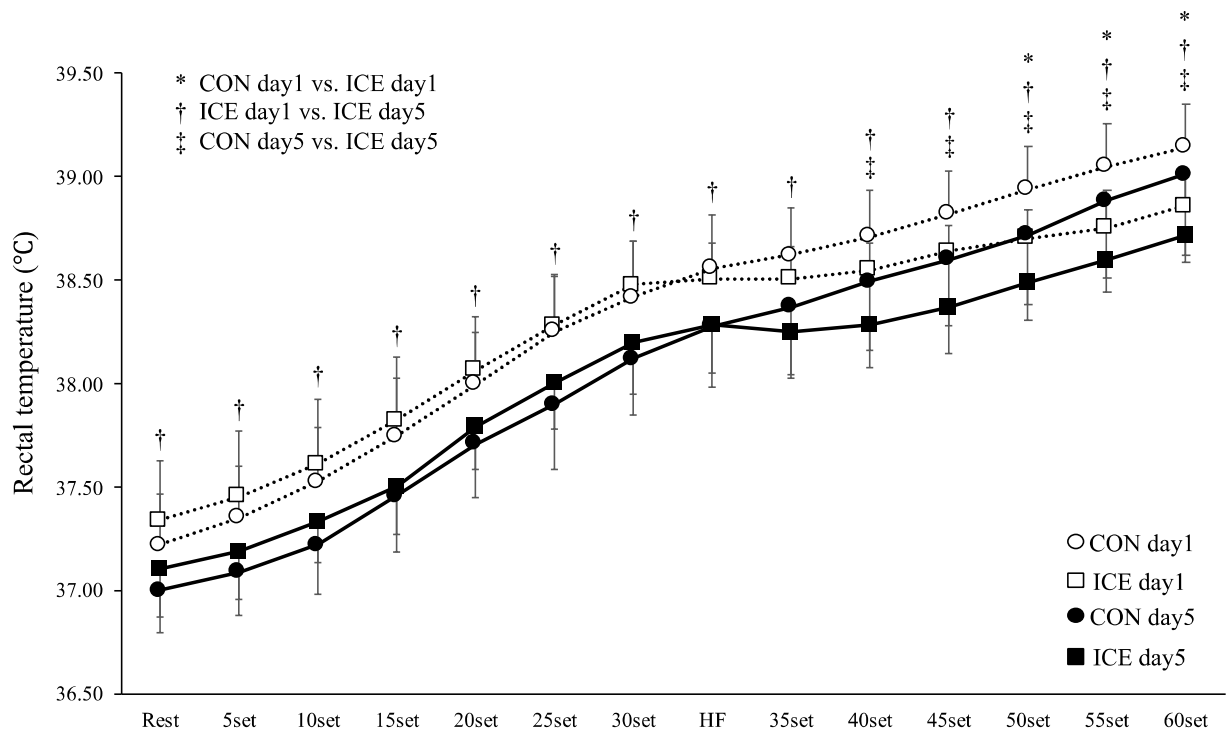
- Benzinger, T. H. (1969) Heat regulation: homeostasis of central temperature in man. *Physiol. Rev.*, 49:671-759.
- Buller, M. J., Latzka, W. A., Yokota, M., Tharion, W., and Moran, D. S. (2008) A real-time heat strain risk classifier using heart rate and skin temperature. *Physiol. Meas.*, 29:N79-N85.
- Burdon, C. A., Hoon, M. W., Johnson, N. A., Chapman, P. G., and O'Connor, H. T. (2013) The effect of ice slushy ingestion and mouthwash on thermoregulation and endurance performance in the heat. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, 23:458-469.
- Castle, P., Mackenzie, R. W., Maxwell, N., Webborn, A. D. J., and Watt, P. W. (2011) Heat acclimation improves intermittent sprinting in the heat but additional pre-cooling offers no further ergogenic effect. *J. Sports Sci.*, 29:1125-1134.
- Garrett, A. T., Goosens, N. G., Rehrer, N. G., Patterson, M. J., and Cotter, J. D. (2009) Induction and decay of short-term heat acclimation. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 107:659-670.
- Garrett, A. T., Goosen, N. G., Rehrer, N. J., Patterson, M. J., Harrison, J. Sammut, I., and Cotter, J. D. (2014) Short-term heat acclimation is effective and may be enhanced rather than impaired by dehydration. *Am. J. Human Biol.*, 26:311-320.
- Helgerud, Høydal, K., Wang, E., Karlsen, T., Berg, P., Bjerkaas, M., Simonsen, T., Helgesen, C., Hjorth, N., Bach, R., and Hoff, J. (2007) Aerobic high-intensity intervals improve VO<sub>2</sub>max more than moderate training. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39:665-671.
- Lee, C. L., Hsu, W. C., and Cheng, C. F. (2017) Physiological adaptations to sprint interval training with matched exercise volume. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 49:86-95.
- Lind, A. R., and Bass, D. E (1963) Optimal exposure time for development of acclimatization to heat. *Fed. Proc.*, 22:704-708.
- Lorenzo, S., Halliwill, J. R., Sawka, M. N., and Minson, C. T. (2010) Heat acclimation improves exercise performance. *J. Appl. Physiol.*, 109:1140-1147.
- Moran, D. S., Shitzer, A., and Pandolf, K. B. (1998) A physiological strain index to evaluate heat stress. *Am. J. Physiol.*, 275:R129-R134.
- Moreira, D. S., Johnson, R. E., and Forbes, A. P. (1945) Adrenal cortex and work in the heat. *Am. J. Physiol.*, 143:169-176.
- Naito, T., Iribe, Y., and Ogaki, T. (2017) Ice ingestion with a long rest interval increases the endurance

- exercise capacity and reduces the core temperature in the heat. *J. Physiol. Anthropol.*, 36:9.
- 内藤・大柿 (2015) 高温環境下における運動パフォーマンス低下の抑制に有効な運動前冷却法. *九州体育・スポーツ学研究*, 30:23-33.
- Naito, T., and Ogaki, T. (2016) Pre-cooling with intermittent ice ingestion lowers core temperature in a hot environment as compared with the ingestion of a single bolus. *J. Therm. Biol.*, 59:13-17.
- Naito, T., Sagayama, H., Akazawa, N., Haramura, M., Tasaki, M., and Takahashi, H. (2018) Ice slurry ingestion during break times attenuates the increase of core temperature in a simulation of physical demand of match-play tennis in the heat. *Temperature*, 5:371-379.
- Neal, R. A., Corbett, J., Massey, H. C., and Tipton, M. J. (2016) Effect of short-term heat acclimation with permissive dehydration on thermoregulation and temperate exercise performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 26:875-884.
- Onitsuka, S., Nakamura, D., Onishi, T., Arimitsu, T., Takahashi, H., and Hasegawa, H. (2018) Ice slurry ingestion reduces human brain temperature measured using non-invasive magnetic resonance spectroscopy. *Sci. Rep.*, 8:2757.
- Roberts, M. F., Wenger, C. B., Stolwijk, J. A., and Nadel, E. R. (1977) Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J. Appl. Physiol.*, 43:133-137.
- Sawka, M. N., Burke, L. M., Eichner, E. R., Maughan, R. J., Montain, S. J., and Stachenfeld, N. S. (2007) American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39:377-390.
- Schleh, N. W., Ruby, B. C., and Dumke, C. L. (2018) Short term heat acclimation reduces heat stress, but is not augmented by dehydration. *J. Therm. Biol.*, 78:227-234.
- Shamsuddin, A. K. M., Kuwahara, T., Oue, A., Nomura, C. Koga, S., Inoue, Y., and Kondo, N. (2005) Effect of skin temperature on the ion reabsorption capacity of sweat glands during exercise in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 94:442-447.
- Siegel, R., Mate, J., Brearley, M. B., Watson, G., Nosaka, K., and Laursen, P. B. (2010) Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 42:717-725.
- Stevens, C. J., Dascombe, B., Boyko, A., Sculley, D., and Callister, R. (2013) Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat. *J Sports Sci.* 31:1271-1279.
- Tyler, C. J., Reeve, T., Hodges, C. J., and Cheung, S. S. (2016) The effects of heat adaptation on physiology, perception and exercise performance in the heat: a meta-analysis. *Sports Med.*, 46:1699-1724.



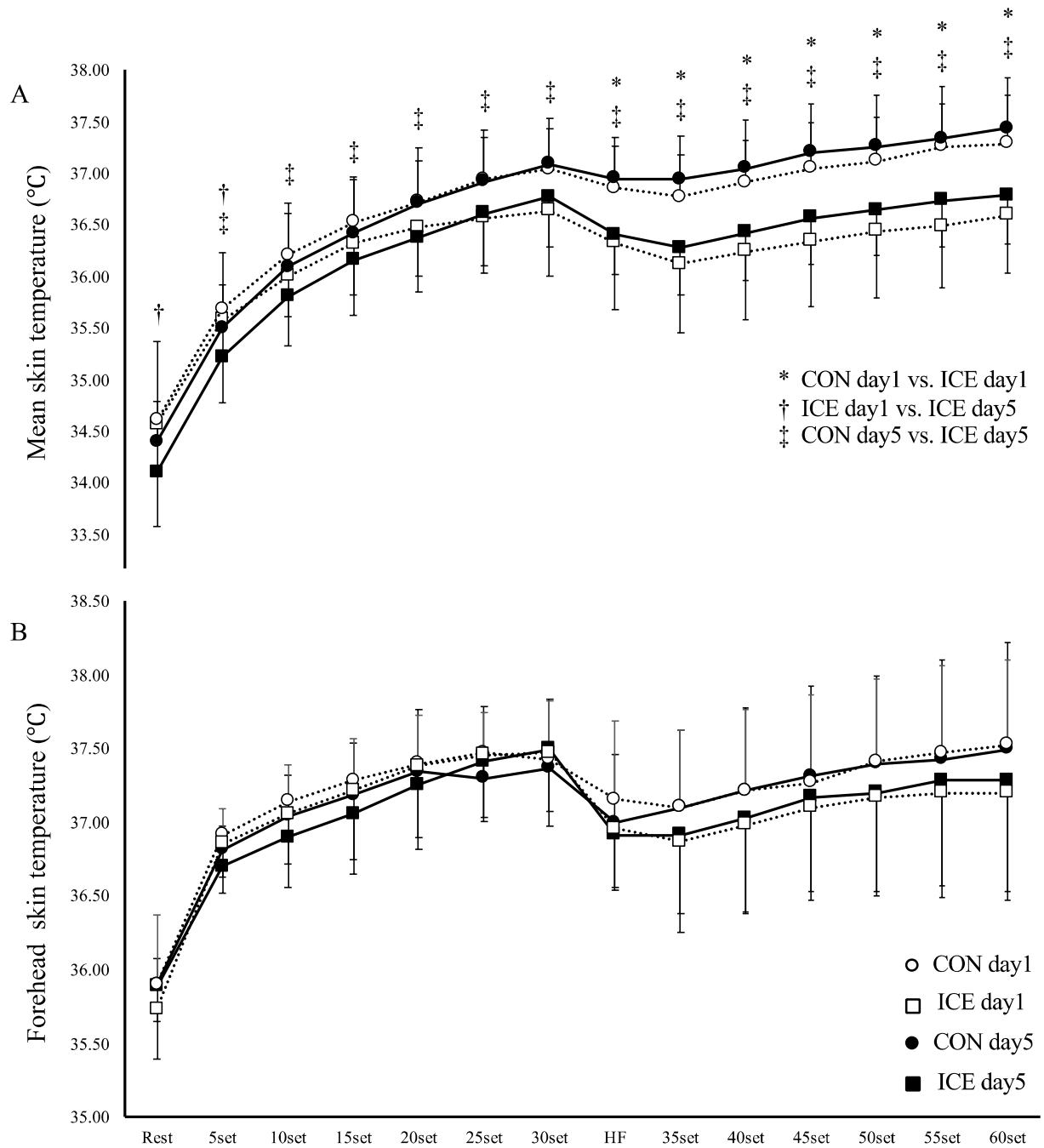


**Figure 1** Schematic of this study.

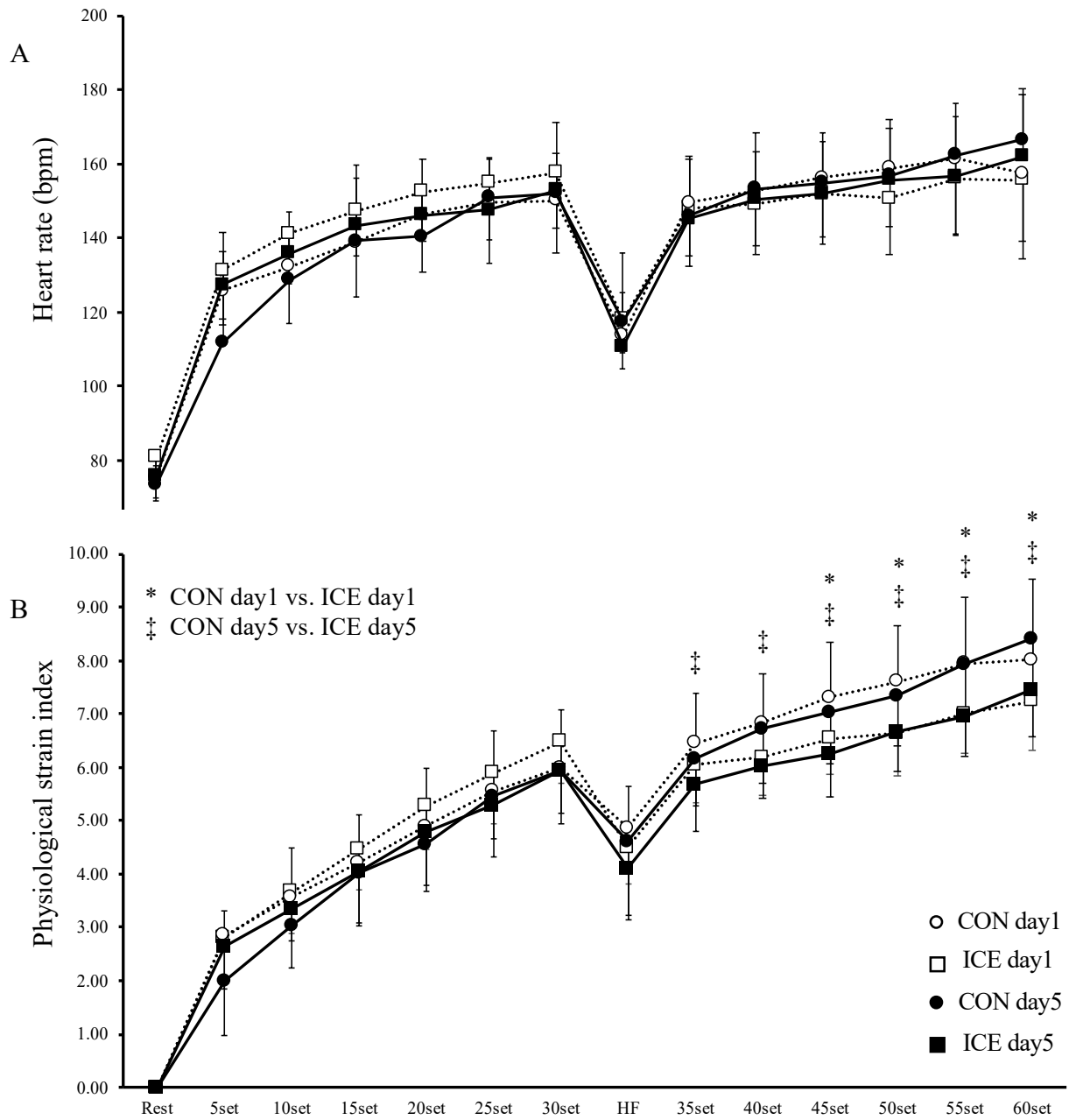


**Figure 2** The rectal temperature under four experimental conditions. The mean values are expressed as mean  $\pm$  SD (CON day 1:  $\circ$ , CON day 5:  $\bullet$ , ICE day 1:  $\square$ , ICE day 5:  $\blacksquare$ ). \*CON day 1 vs. ICE

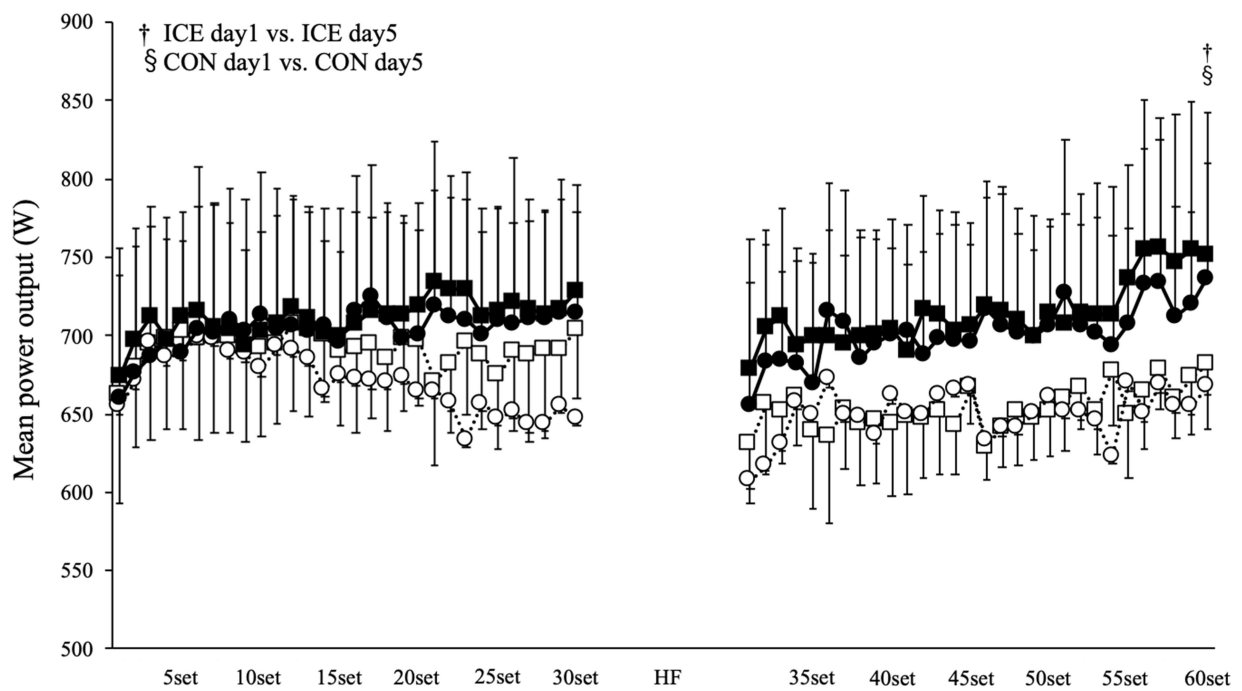
day 1, †ICE day 1 vs. ICE day 5, ‡CON day 5 vs. ICE day 5.



**Figure 3** The mean skin temperature (A) and forehead skin temperature under four experimental conditions. The mean values are expressed as mean  $\pm$  SD (CON day 1: ○, CON day 5: ●, ICE day 1: □, ICE day 5: ■). \*CON day 1 vs. ICE day 1, †ICE day 1 vs. ICE day 5, ‡CON day 5 vs. ICE day 5.



**Figure 4** The heart rate (A) and physiological strain index under four experimental conditions. The mean values are expressed as mean  $\pm$  SD (CON day 1:  $\circ$ , CON day 5:  $\bullet$ , ICE day 1:  $\square$ , ICE day 5:  $\blacksquare$ ).  
\*CON day 1 vs. ICE day 1, ‡CON day 5 vs. ICE day 5.



**Figure 5** Mean power output under four experimental conditions. The mean values are expressed as mean  $\pm$  SD (CON day 1:  $\circ$ , CON day 5:  $\bullet$ , ICE day 1:  $\square$ , ICE day 5:  $\blacksquare$ ). † and § main effects for trial.

**Table 1** Aerobic performance results of the control trial (CON) and acclimation during cooling trial (ICE) at pre- and post-heat acclimation.

	CON		ICE	
	Pre	Post	Pre	Post
$\dot{V}O_{2\max}$ (ml/kg/min)	43.3 $\pm$ 9.5	45.7 $\pm$ 9.1*	43.7 $\pm$ 8.4	45.7 $\pm$ 8.6*
LT <sub>watt</sub> (W)	175.7 $\pm$ 15.9	177 $\pm$ 14	176.2 $\pm$ 8.7	176.1 $\pm$ 15.3
$w\dot{V}O_{2\max}$ (W)	242 $\pm$ 9.1	258.4 $\pm$ 22.7	244.6 $\pm$ 16.4	268.6 $\pm$ 5.5*

\* Pre vs. Post ( $P < 0.05$ ). Data are presented as mean  $\pm$  SD.

**Table 2** The hydration state on the first and last days of the control trial (CON) and acclimation during cooling trial (ICE).

	CON		ICE	
	day 1	day 5	day 1	day 5
Body mass change (kg)	0.01±0.42	-0.20±0.40	0.07±0.32	0.08±0.42
Total sweat loss (kg)	1.368±0.263	1.587±0.239†	1.315±0.135	1.307±0.251*
Sweating Na <sup>+</sup> (mmol/l)	92±15	67±14*	84±16	77±19

\*day 1 vs. day 5 (P<0.05) and †day 1 vs. day 5 (P<0.10).

**Table 3** Thermal stress and strain on the first and last days of the control trial (CON) and acclimation during cooling trial (ICE).

	CON		ICE	
	day 1	day 5	day 1	day 5
Mean heart rate (bpm)	141±13	140±12	143±12	140±12
Tre change (°C)	1.92±0.19	2.01±0.39	1.52±0.29**	1.61±0.29**
Tre at the end of exercise (°C)	39.14±0.21	39.01±0.39	38.86±0.16**	38.72±0.13**
Time to Tre 38.5°C (min)	42.6±13.0	56.0±17.9*	45.3±17.2	64.9±16.8*‡

\*day 1 vs. day 5 (P<0.05), \*\*CON vs. ICE (P<0.05) and ‡CON vs. ICE (P<0.10).

**Table 4** Work load on the first and last days of the control trial (CON) and acclimation during cooling trial (ICE).

	CON		ICE	
	day 1	day 5	day 1	day 5
Mean PPO (W)	805±91	854±95*	823±79	868±74*
Total work done (kJ)	198.0±20.6	211.0±21.4*	206.1±14.3‡	218.3±19.1*‡

\*day 1 vs. day 5 ( $P<0.05$ ), ‡CON vs. ICE ( $P<0.05$ )