

2018年度 修士論文

常温環境下での運動トレーニングおよび温水浴の組み合わせが
体温調節能と運動パフォーマンスに及ぼす影響

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5017A044-0

張 黎栗

研究指導教員：村岡 功 教授

目次

第1章 緒言	1
第2章 文献考証.....	4
2.1. 暑熱曝露に対する生理応答	4
2.2. 暑熱環境における運動と生理応答	5
2.3. 暑熱環境における運動と生理的適応.....	6
2.4. 暑熱馴化トレーニング.....	6
2.5. 他の熱ストレス刺激との組み合わせ.....	8
第3章 方法.....	10
3.1. 被験者	10
3.2. 実験手順.....	12
3.3. 最大酸素摂取量の測定.....	14
3.4. 熱負荷テスト	14
3.5. 暑熱馴化プロトコル	15
3.6. 測定項目	16
3.7. 統計解析.....	17
第4章 結果.....	18
第5章 考察.....	28

第 6 章 結論	33
参考文献	34
謝辭	39

第1章 緒言

現在行われている国際的なスポーツ競技会は、暑熱環境下で開催されることも多いため、その際には、スポーツ選手に様々な悪影響がもたらされる。運動時の適度な体温および筋温の上昇はウォーミングアップ効果として知られているように、代謝、筋肉への神経伝導速度、および関節可動域を高めることで、運動パフォーマンスを向上させることが示されている(Stewart et al. 1998; Pearce et al. 2012)。一方、暑熱環境下における運動時の過度な体温上昇は、熱中症や運動パフォーマンスの低下を引き起こすことが報告されている(Cheung et al. 2007)。また、暑熱環境下での運動は熱痙攣、熱失神、熱疲労および熱射病などの様々な熱関連障害を生じさせる(Boden et al. 2007)。先行研究では、核心温が 40°C を超えると運動の遂行が不可能になることが報告されている(Nielsen et al. 1993)。また、暑熱環境下における過度な体温上昇は運動能力だけではなく、認知機能にも影響を及ぼすことが示されている(Hasegawa et al. 2012)。そのため、熱中症のリスクを低減し、暑熱環境下における運動パフォーマンスを改善するためには、暑熱馴化トレーニングを行うことが必須であると考えられる。

伝統的な暑熱馴化トレーニングのプロトコルは、一般的に 7~14 日間が必要であると考えられており、暑熱環境下で 1~2 時間に亘り運動を継続する方法が推奨されている(Zurawlew et al. 2016; Casadio et al. 2017)。暑熱馴化トレーニングにおける運動能

力の改善効果は、発汗速度の増加、心血管系負担の減弱および熱快適感の改善によってもたらされる(Walsh et al. 2018)。しかしながら、暑熱馴化トレーニングは人工的な実験室を利用して暑熱曝露を繰り返すなど、特殊な環境下でトレーニングを実施する必要があり、寒冷地に居住する選手では設備や費用の面からもあまり実用的ではない。また、長期間に亘る暑熱馴化トレーニングでは、通常トレーニングの質を低下させることが指摘されている(Laursen et al. 2017)。

これらの問題を解決するために、近年、Zurawlew et al. (2016)は、6 日間に亘る常温環境下での運動(40 分間)と、その直後に行う温水浴(40 分間)との組み合わせが暑熱馴化に及ぼす影響を検討した。その結果、常温環境下での運動と温水浴との組み合わせは、最大下運動時の直腸温、皮膚温および主観的な生理指標(主観的運動強度および温熱感)のスコアを低下させ、運動パフォーマンスを向上させることが示されている。この結果から、6 日間に亘る常温環境下での運動トレーニングと温水浴との組み合わせは、暑熱馴化に有効であることが示唆される。

しかしながら、この先行研究では、二つの問題点が挙げられている。まず、入浴時間が 40 分間と長く、被験者に大きな負担がかかるため、スポーツ現場において実用的な方法ではない点である。また、この研究では、運動トレーニングのみを行うコントロール(CON)群が設定されておらず、暑熱環境下での運動パフォーマンスの向上が常温環境下での運動トレーニング自体によってもたらされたのか否かを判断することは困難で

ある。これらの問題を解決するため、本研究では、運動トレーニングのみを行う CON 群を設定した。

先行研究では、5～10 日間に亘る暑熱環境下での熱曝露あるいは運動によって直腸温を 1～2 時間上昇させることで、暑熱馴化適応が生じると示唆されている(Nadel et al. 1974; Andrew et al. 2009)。また、核心温および皮膚温の上昇は、暑熱馴化適応を達成するために重要であることが報告されている(Regan et al. 1996)。これらのことから、40 分間の運動と温水浴 20 分間との組み合わせによる 1 時間の介入が、暑熱馴化適応を引き起こす可能性があるとも考えられる。

そこで、本研究では、常温環境下での運動トレーニングおよびその直後に行う 20 分間の温水浴の組み合わせが暑熱馴化に及ぼす影響を、40 分間の温水浴による影響と比較することを目的とした。本研究では、運動トレーニングおよびその直後に行う 20 分間の温水浴の組み合わせは、40 分間の温水浴を行う場合と同様に暑熱馴化適応が得られるとの仮説を立てた。

第2章 文献考証

2.1. 暑熱曝露に対する生理応答

ヒトにおける核心温の恒常性はかなり狭い範囲(35～41°C)で機能しており、平均温度は約 36.5～37.5°C である。核心温は、様々な要因によって変化する。例えば、食事の摂取、運動、環境条件および病気などの要因である。核心温の恒常性維持機能により、環境温度が変化しても核心温は一定の範囲に維持される。この体温調節機能には脳が重要な役割を果たしている。視索前野にある温度感受性ニューロンは、温度の変化を感知し、体温調節の応答を変化させる。また、体温調節は、熱生成と熱損失との間のバランスによって達成されることが知られている。

ヒトが暑熱環境下に曝露された場合や、運動を行った場合には、熱生成(H_{prod})が熱損失(H_{loss})を上回り、その結果として体内蓄熱(S)が増加し、核心温度を上昇させることが報告されている(Hosokawa, 2018)。

$$H_{\text{prod}} = H_{\text{loss}} \pm S$$

さらに、人々が暑熱環境下に曝露された場合には、身体に大きな影響があると考えられる。しかし、相対湿度(RH)の 5%上昇は、気温の 1°C 上昇に相当することから、環境温度だけではなく、相対湿度も生理的パラメータの変化に影響することが報告されている(Sawka et al. 2015)。ヒトは暑熱環境下における曝露時間の増加とともに、収縮期血圧、

拡張期血圧、心拍数、直腸温度、皮膚温度、口腔温度、および呼吸数も増加することが報告されている(Gisolfi et al. 1969; Brotherhood et al. 2008)。

2.2. 暑熱環境下における運動と生理応答

暑熱環境下での運動では、過度な体温上昇を抑制するために、皮膚血流量が増加するとともに発汗量も増加する。皮膚血管の拡張は、皮膚への血液量を増大させ、心臓に戻る血液量および1回心拍出量を低下させる。そのため、心拍出量を維持するために心拍数が増加する。

暑熱環境下での運動パフォーマンスが低下する理由としては、皮膚血管の拡張により、皮膚への血液量が増大し、骨格筋への血流量が大きく減少するためであると考えられている。また、血液中の酸素含有量は減少し(Lee et al. 2015)、有酸素運動能力が低下することが報告されている(Galloway & Maughan 1997)。さらに、暑熱環境下での長時間運動時に水分摂取を行わないと、発汗によって脱水状態になる。脱水状態では、血液濃縮によって心拍出量や筋血流量が制限される可能性がある(ACSM. 2009)。先行研究によると、脱水も暑熱環境下での運動能力を低下させる一つの要因である。体重の約1%の脱水は直腸温の約0.3°Cの上昇を、心拍数では5~10拍/分の上昇をきたすことが分かっている。また、暑熱環境下における自己ペースでの運動時には、平均パワー出力、

最大酸素摂取量、および最大パワー出力が減少することが示唆されている(Périard et al. 2011b)。

2.3. 暑熱環境下における運動と生理的適応

暑熱環境下での運動は身体に悪い影響を与えると考えられるが、継続的に暑熱環境下で運動トレーニングを行うと、血漿量が増えることが報告されている(Lorenzo et al. 2010)。実際に、先行研究では、8 日間のトレーニングにより血漿量の増加が認められている。また、常温環境下での最大酸素摂取量も増加することが示唆されている。さらに、暑熱環境下での運動トレーニングは、皮膚の血管拡張および発汗をより低い核心温閾値で開始させ、より高い発汗率を持続することができるようにすると考えられている(Nagashima et al. 2012)。また、先行研究では、運動および熱曝露の組み合わせが核心温閾値を低下させることも報告されている(Roberts et al. 1997)。

2.4. 暑熱馴化トレーニング

熱関連障害などのリスクを防ぐために、暑熱馴化の概念が提案された(Howe et al. 2007)。暑熱馴化、すなわち熱環境下での運動トレーニングは、人体の保護的生理学的応答によって高温環境に適応するのに有効であり、身体の耐熱能力を改善することができる。先行研究では、暑熱馴化適応を短期暑熱馴化(4～7 日間)、中期暑熱馴化(8～14

日間)、および長期暑熱馴化(14 日間以上)の 3 つの期間に分類し、暑熱トレーニングプロトコルを決定している(Casadio et al. 2016)。暑熱環境下での運動は、暑熱馴化を引き起こすための最も有効な方法である。しかしながら、熱曝露においても同様に、暑熱馴化における複数の適応をもたらす(Takamata et al. 2001; Beaudin et al. 2009; Brazaitis & Skurvydas 2010)。

伝統的な暑熱トレーニングプロトコルは、8～21 日間に亘って、1 日に 60～100 分間、高温環境(30～45°C、10～90%RH)で運動を行うことを推奨している(Chalmers et al. 2014; Tyler et al. 2016)。また、少なくとも 10 日間行うことで、完全な暑熱馴化の効果が得られることが報告されている(Garrett et al. 2011; Laursen et al. 2017)。しかし、アスリートに対して、長期暑熱馴化トレーニングを行う場合には、通常の訓練にも影響することが考えられる。一方、馴化に要する日数は非鍛錬者よりも鍛錬者の方で短くなることが報告されている(長谷川 博. 2018)。そこで、近年、短期暑熱馴化法が注目されている。短期暑熱馴化の効果は、皮膚血管拡張および発汗閾値の低下、発汗率の上昇、心血管系への負担の減少、核心温度の低下および主観的運動強度(RPE)の低下などによって示されている。中期暑熱馴化および長期暑熱馴化と比べて、生理的な応答の変化率は小さくなることが報告されているが、実際の現場では、実用性の観点からその有用性が提唱されている。

2.5. 他の熱ストレス刺激との組み合わせ

鍛錬者のために適用される代替の暑熱馴化トレーニングは、伝統的な暑熱馴化トレーニングにおける問題点を克服しながら生理学的適応を引き出すことが示されている。具体的には、サウナへの曝露や、運動とサウナ曝露との組み合わせといった方法が行われている。サウナ曝露のプロトコルは、3週間に亘って継続的または断続的に高温環境(80～90°C、10～20%RH)でのサウナ曝露である。また、この研究では、一日に少なくとも30分間以上、全10回の介入から構成されていたが、実際に暑熱馴化の効果が得られたことが報告されている(Scoon et al. 2007; Stanley et al. 2015)。

先行研究では、サウナ曝露により体温および心拍数が上昇し、多量の発汗や体重減少が起こることも示されている(Leppäluoto et al. 1986)。繰り返しのサウナ曝露後の終了時には、直腸温および心拍数の低下が生じることも観察されている。しかしながら、サウナによる皮膚血流の増加は、末梢抵抗の低下、ひいては拡張期血圧の低下につながる(Leppäluoto et al. 1986)。他の研究では、運動と直後に行うサウナ曝露との組み合わせによって、血漿量が増加し、持久運動パフォーマンスを向上させることが報告されている(Cotter et al. 2007)。しかしながら、この研究では核心温を測定していないため、運動と直後に行うサウナ曝露との組み合わせによって生じた体温調節機能の向上については、サウナ曝露のみの研究と比較することができない。

近年、局所浸水および温水浴が暑熱馴化トレーニングの一つとして行われている。先行研究では、2 週間に亘って 45 分間の半身温水浴(44°C)を 7 回行うことで、直腸温(-0.3°C)および心拍数($-11.9 \pm 2.3 \text{ beats} \cdot \text{min}^{-1}$)の低下を介して、生理的負担度(PSI)および心臓血管系への負担を減少させることが示された。また、発汗能力が向上したとの報告もある(Brazaitis & Skurvydas 2010)。その後、Zurawlew et al. (2016)の研究によって、温水浴の介入後、安静時および運動時の直腸温が抑制され、最大下運動中の皮膚温の低下が認められた。また、この研究では、最大下運動中において RPE および温熱感のスコアが減少し、運動パフォーマンスが向上することが示されている。この結果は、短期間に亘る伝統的な暑熱馴化トレーニングによって示されている適応効果と同等であると言える。

第3章 方法

3.1. 被験者

若年の健常な成人男性 16 名を被験者とした。すべての参加者は、非喫煙者であり、既知の疾病がなく、投薬を受けていない者とした。内臓および整形外科的疾患を有する者は、実験の危険性が高まることが予想されるため、被験者から除外した。また、実験結果への影響を回避するために、過去 1 ヶ月に週 3 回、1 回当たり 100 分間の暑熱曝露を繰り返していた者、および研究実施期間に他の介入研究に参加している者は募集基準から除外した。

被験者の身体特性を表 1 に示した。被験者には、研究の目的、方法、およびそれに伴う危険性について、文書および口頭で説明し、研究に参加する同意を得た。被験者は、①常温環境下での運動トレーニング試行群(CON 群)、②常温環境下での運動トレーニング+温水浴 20 分間群(HWI₂₀ 群)、③常温環境下での運動トレーニング+温水浴 40 分間群(HWI₄₀ 群)、の 3 群に無作為割付を行った。なお、本研究は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員の承認(No.2017-289)の後に行われた。

Table 1. Physical characteristics of subjects.

Varisbles	Trial									
	Control			HWI ₂₀			HWI ₄₀			
Age (year)	24	±	3.3	25	±	2.9	23	±	1.3	n.s.
Height (cm)	172.8	±	2.9	174.8	±	6.2	174.8	±	7.5	n.s.
Weight (kg)	72.1	±	9.0	62.6	±	10.9	72.4	±	14.2	n.s.
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	48.5	±	6.8	51.2	±	10.3	44.2	±	6.2	n.s.
PPO(W)	260	±	47.6	267	±	67.4	253	±	23.4	n.s.
PPO(W/kg)	3.6	±	0.7	4.3	±	1.0	3.6	±	0.6	n.s.

$\dot{V}O_{2\max}$: maximal oxygen uptake, PPO: peak power output.

3.2. 実験手順

事前測定および最大酸素摂取量の測定を同一日に実施した。運動パフォーマンステストへの影響を避けるために、トレーニング介入前日までに 2 日間の休息を挟んだ後に、介入前の熱負荷テストを行った。その後 6 日間に亘る常温環境下での運動トレーニングと温水浴の組み合わせによる暑熱馴化トレーニングを行った。介入終了後、2 日間の休息日を挟み、再度熱負荷テストを行った。暑熱環境下での運動およびまたは 40°C 温水浴による高体温に伴う熱中症を予防するために、実験中は常に生理学的指標を観察することにより、被験者の安全を確保した。また、実験の前日および実施日には、被験者の体調を聴取し、日常と異なる症状を訴えた場合には実験を中止した。

実験はすべて人工気候室で行われ、熱負荷テスト時の室温は 38°C、相対湿度は 40% であり、暑熱馴化トレーニング時の室温は 20°C、相対湿度は 40% とした。また、温水浴の水温は 40°C に設定した。実験手順を図 1 に示した。

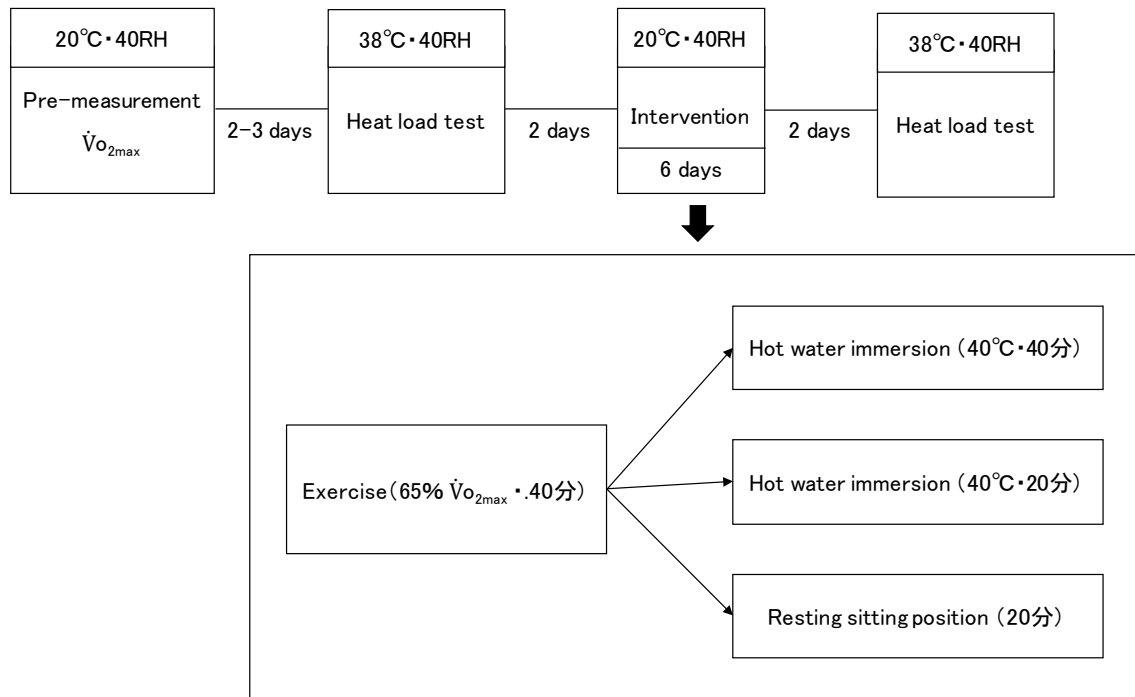


Figure 1. Experimental procedure.

3.3. 最大酸素摂取量の測定

最大酸素摂取量を測定する前日は、被験者の運動を制限し、カフェインおよびアルコールの摂取を禁止した。測定は、常温環境(室温 20°C、湿度 40%)に設定した人工気候室の中で行った。被験者は指定の時間帯に実験室に到着し、ショーツ、ソックス、スポーツウェアを着用した。その後体重 1kg あたり 5mL の水分を摂取してから、体重、身長および体脂肪率を測定した。入室後、心電図用電極、直腸温用温度計およびマスクの装着が完了した後に、3 分間の安静を挟み、その後自転車エルゴメータによる運動を開始した。運動は、50W・60 回転/分の負荷から開始し、その後 1 分毎に 20W ずつ負荷を漸増させた。心拍数および RPE は負荷を上げる直前に実験測定表へ記入した。被験者が疲労困憊に達するか、回転数の維持が不可能、酸素摂取量がプラトー、呼吸商が 1.1 以上、および心拍数が年齢予測による最高心拍数の 95%以上のうち 2 つの以上の基準を満たした場合に測定終了とした。運動終了後、水分を摂取させ、心拍数が 120 拍以下に低下してから実験を終了した。

3.4. 熱負荷テスト

熱負荷テストは暑熱馴化トレーニングの前後に 2 回行った。熱負荷テストを行う前日は、被験者の運動を制限し、カフェインおよびアルコールの摂取を禁止した。熱負荷テストは、暑熱環境(室温 38°C、湿度 40%)に設定した人工気候室の中で行った。被験者

は実験室到着後、10 分間の安静を挟み、その後、自転車エルゴメータにて、最大出力パワーの 40%の負荷で 60 分間運動を継続した。その後、10 分間の休息を挟み、漸増負荷による疲労困憊運動(30 秒毎に 2%ずつ最大出力パワーを増加)を行った。実験中には、直腸温度を 10 秒間隔で、また、心拍数、RPE および温熱感を 5 分間隔で測定した。ただし、直腸温が 39.5°C を超えるか、または心拍数が年齢予測による最高心拍数の 95%以上に達した時点で測定は終了とした。なお、測定終了後には、汗をよく拭きとってから体重を測定した。体重の測定後、水分を被験者に摂取させた。被験者の心拍数が 120 拍以下に低下し、直腸温が 38.5°C以下に下がってから実験を終了した。

3.5. 暑熱馴化プロトコル

暑熱馴化トレーニングは 6 日間連続して行った。運動は全て、常温環境(室温 20°C、湿度 40%)に設定した人工気候室の中で行った。被験者は指定の時間帯に実験室に到着し、ショーツ、ソックス、スポーツウェアを着用した。その後体重 1kg あたり 5mL の水分を摂取してから、体重、身長および体脂肪率を測定した。入室後、心電図用電極および直腸温用温度計の装着が完了した後に、3 分間の安静を挟み、その後自転車エルゴメータによる運動を開始した。運動は、 $65\% \dot{V}O_{2\max} \cdot 60$ 回転/分で 40 分間のサイクリングであった。運動開始から 20 分までの間に、体重 1kg あたり 5mL の水分を摂取させ

た。運動の終了後(2～3 分間の移動)、被験者は、頸部まで温水に浸った。入浴は、水温 40°C のバスタブにて行った。

安静時および運動時には、直腸温を継続的に、また、心拍数、RPE および温熱感を 5 分間隔で測定した。加えて、直腸温は温水浴中にも継続的に、また、RPE および温熱感を 5 分間隔で測定した。ただし、直腸温が 39.5°C を超えるか、心拍数が年齢から予測される最高心拍数の 95%を超えた場合、あるいは被験者が過度な不快感を訴えた場合には、トレーニングまたは入浴を中止した。介入終了後、水を拭きとってから体重を測定した。その後、体重 1kg あたり 5mL の水分を摂取させた。被験者の心拍数が 120 拍以下に低下し、直腸温が 38.5°C 以下に下がってから実験を終了した。

3.6. 測定項目

事前測定において、個人情報(年齢、運動習慣など)は被験者から直接聴取し、身長は身長計を用いて測定した。生体インピーダンス法により、体重および体脂肪率を測定した。熱負荷テストおよび暑熱馴化トレーニングを行う際に、データ収集型ハンディタイプの温度計(LT-8)を用いて直腸温度を 10 秒間隔で測定した。温度計は肛門から直径約 3.5mm のプローブを自身で挿入させ、肛門括約筋の奥 10 センチに装着させた。

最大酸素摂取量を計測する際には、マスクを装着させ、連続的呼気ガス分析装置 (AE-300SRC および AE-310S)を用いて、実験開始から実験終了までの間、連続的に測定した。

暑熱馴化トレーニング期間中に、酸素摂取量を測定して、運動トレーニングの強度を確認すると共に、負荷を調整した。心拍数は心電図ベッドサイドモニタ(BSM-2300)を用いて測定した。実験期間中には、心拍数を実験開始から実験終了まで連続して測定した。また実験の際には、主観的運動強度および温熱感を 5 分ごとに測定した。ただし、漸増負荷テストを行う際には、これらを 2 分ごとに測定した。

3.7. 統計解析

各々のデータは平均±標準偏差で表した。統計処理は SPSS バージョン 24 を用いて行った。群内の比較には、1 要因分散分析(対応あり)を用いた。群間の比較には、一元配置の分散分析を用い、多重比較検定には、Tukey の test を用いた。統計学的有意水準は危険率 5%未満とした。

第4章 結果

4.1. 介入期間

各群の介入期間における生理的指標および主観的指標を、表 2、表 3 および表 4 にそれぞれ示した。入浴前の 40 分間の運動では、いずれの群においても全項目で有意な変化は認められなかった。介入の 6 日目において、HWI₂₀ 群の被験者全員が 20 分間の温水浴を完了したが、HWI₄₀ 群では 1 人の被験者が 40 分間の温水浴を完了することができなかった。また、HWI₂₀ 群と HWI₄₀ 群の介入期間における運動時間および入浴時間の平均値を、表 5 にそれぞれ示した。介入期間における運動時間では、HWI₂₀ 群および HWI₄₀ 群において有意な変化は認められなかった。介入期間における入浴時間でも、HWI₂₀ 群および HWI₄₀ 群においてそれぞれ有意な変化は認められなかった。

Table 2. Thermoregulatory variables during intervention in CON group.

Variables	Control					
	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6
Exercise						
HRmean (bpm)	143.0 ± 11.4	145.7 ± 13.6	151.8 ± 15.7	144.8 ± 14.9	151.7 ± 13.5	145.2 ± 7.3 n.s.
Resting Tre (°C)	37.0 ± 0.2	37.2 ± 0.2	37.1 ± 0.4	37.0 ± 0.3	37.3 ± 0.3	37.1 ± 0.6 n.s.
End Tre (°C)	38.0 ± 0.3	38.1 ± 0.1	38.1 ± 0.2	37.9 ± 0.2	38.2 ± 0.2	38.2 ± 0.3 n.s.
Changes of Tre (°C)	1.0 ± 0.2	0.8 ± 0.2	1.0 ± 0.2	0.9 ± 0.2	1.0 ± 0.4	1.0 ± 0.4 n.s.
SV (kg)	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.2 n.s.
Dehydration rate (%)	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.2	0.7 ± 0.2	0.6 ± 0.3 n.s.

HR: heart rate, Tre: rectal temperature, End: after exercise, TS: thermal sensation, SV: sweat volume, n.s.: not significant, Data displayed as mean ± SD.

Table 3. Thermoregulatory variables during intervention in HWI₂₀ group, including exercise index and HWI index.

Variables	HWI ₂₀												
	Day 1		Day 2		Day 3		Day 4		Day 5		Day 6		
Exercise													
HRmean (bpm)	146.9	± 7.1	143.6	± 9.0	139.7	± 11.9	140.0	± 9.6	141.8	± 6.8	141.4	± 5.1	n.s.
Resting Tre (°C)	37.5	± 0.2	37.3	± 0.2	37.2	± 0.3	37.3	± 0.2	37.2	± 0.2	37.4	± 0.2	n.s.
End Tre (°C)	38.4	± 0.2	38.4	± 0.4	38.3	± 0.3	38.3	± 0.3	38.4	± 0.4	38.4	± 0.4	n.s.
Changes of Tre (°C)	0.8	± 0.2	1.0	± 0.4	1.1	± 0.5	0.9	± 0.4	1.1	± 0.4	0.9	± 0.3	n.s.
Water Immersion													
Start Tre (°C)	38.3	± 0.3	38.4	± 0.4	38.3	± 0.3	38.4	± 0.5	38.4	± 0.4	38.3	± 0.3	n.s.
End Tre (°C)	38.9	± 0.2	38.6	± 0.3	38.7	± 0.5	38.4	± 0.3	38.5	± 0.4	38.6	± 0.3	n.s.
Changes of Tre (°C)	0.5	± 0.4	0.3	± 0.2	0.4	± 0.3	0.1	± 0.4	0.1	± 0.4	0.3	± 0.3	n.s.
Participants (n)	2	/ 6	4	/ 6	5	/ 6	6	/ 6	5	/ 6	6	/ 6	n.s.
SV (kg)	0.8	± 0.3	0.8	± 0.4	0.8	± 0.4	0.9	± 0.4	0.8	± 0.3	0.8	± 0.3	n.s.
Dehydration rate (%)	1.2	± 0.5	1.3	± 0.7	1.3	± 0.8	1.4	± 0.6	1.2	± 0.6	1.3	± 0.4	n.s.

HR: heart rate, Tre: rectal temperature, End: after exercise, SV: sweat volume, n.s.: not significant, Data displayed as mean ± SD.

Table 4. Thermoregulatory variables during intervention in HWI₄₀ group, including exercise index and HWI index.

Variables	HWI ₄₀						
	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	
Exercise							
HRmean (bpm)	144.9 ± 3.4	139.9 ± 3.9	140.5 ± 5.0	139.0 ± 3.3	138.6 ± 4.6	139.8 ± 2.9	n.s.
Resting Tre (°C)	37.4 ± 0.5	37.3 ± 0.2	37.4 ± 0.6	37.3 ± 0.2	37.3 ± 0.4	37.4 ± 0.3	n.s.
End Tre (°C)	38.2 ± 0.3	38.2 ± 0.2	38.1 ± 0.4	38.0 ± 0.2	38.1 ± 0.3	38.1 ± 0.2	n.s.
Changes of Tre (°C)	0.8 ± 0.4	0.8 ± 0.3	0.7 ± 0.3	0.7 ± 0.3	0.8 ± 0.3	0.7 ± 0.2	n.s.
Water Immersion							
Start Tre (°C)	38.2 ± 0.3	38.1 ± 0.2	38.1 ± 0.4	38.0 ± 0.2	38.0 ± 0.3	38.0 ± 0.2	n.s.
End Tre (°C)	39.0 ± 0.3	39.0 ± 0.4	39.0 ± 0.3	39.1 ± 0.4	39.0 ± 0.3	39.1 ± 0.2	n.s.
Changes of Tre (°C)	0.8 ± 0.4	0.9 ± 0.4	0.9 ± 0.5	1.1 ± 0.5	1.0 ± 0.4	1.1 ± 0.3	n.s.
Participants (n)	1 / 6	1 / 6	2 / 6	1 / 6	2 / 6	5 / 6	n.s.
SV (kg)	1.0 ± 0.3	1.3 ± 0.4	1.3 ± 0.3	1.4 ± 0.4	1.4 ± 0.5	1.6 ± 0.5	n.s.
Dehydration rate (%)	1.5 ± 0.5	1.8 ± 0.6	1.8 ± 0.5	2.0 ± 0.7	2.0 ± 0.7	2.3 ± 0.9	n.s.

HR: heart rate, Tre: rectal temperature, End: after exercise, SV: sweat volume, n.s.: not significant. Data displayed as mean ± SD.

Table 5. The time of exercise and hot water immersion in HWI₂₀ group and HWI₄₀ group during intervention.

Variables	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	
HWI ₂₀							
Exercise time (min)	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	n.s.
Immersion time (min)	17.5 ± 2.2	19.1 ± 1.6	19.4 ± 1.5	20.0 ± 0.0	18.8 ± 3.0	20.0 ± 0.0	n.s.
HWI ₄₀							
Exercise time (min)	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	40.0 ± 0.0	n.s.
Immersion time (min)	26.7 ± 9.3	28.5 ± 5.8	32.1 ± 6.8	33.7 ± 5.6	34.2 ± 4.9	39.2 ± 2.0	n.s.

n.s.: not significant. Data displayed as mean ± SD.

6 日間の介入期間における直腸温、発汗量および脱水率の比較を図 2 に示した。各試行における、直腸温が 38.5°C 以上を継続した時間(6 日間の平均値)の比較では、CON 群と HWI₄₀ 群の間に有意差が認められた($p < 0.05$)。また、各試行における、発汗量(SV)の(6 日間の平均値)比較では、HWI₄₀ 群と他の 2 群との間に差が認められ(vs. CON 群、 $p < 0.01$ 、vs. HWI₂₀ 群、 $p < 0.05$)、脱水率(6 日間の平均値)の比較では、CON 群と HWI₄₀ 群の間に有意差が認められた($p < 0.01$)。

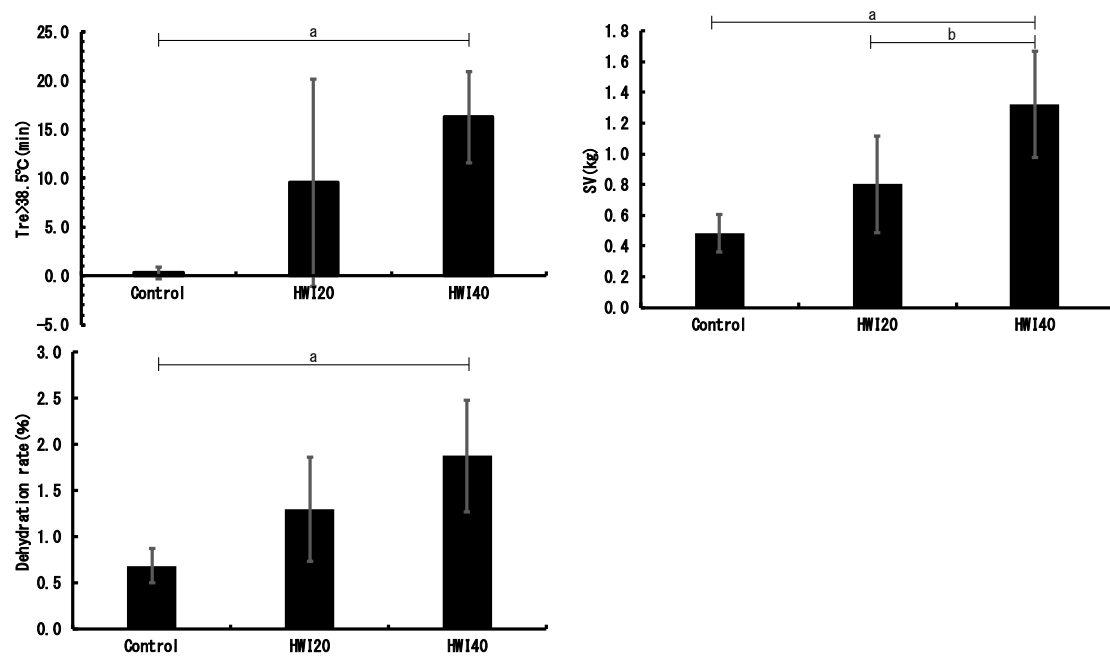


Figure 2. Physiological indicators during the six-day interventions.

SV: sweat volume, Data displayed as mean $\pm$ SD. a: $p < 0.05$ vs. Control.

b: $p < 0.05$ vs. HWI₂₀. Tre: duration longer than Tre > 38.5°C.

Table 6. The results of thermal load test before and after intervention.

	Trial											
	Control (n=4)				HWI ₂₀ (n=6)				HWI ₄₀ (n=6)			
	Pre		Post		Pre		Post		Pre		Post	
Time (min)	59.0	± 2.0	60.0	± 0.0	52.0	± 7.4	59.7	± 0.8*	60.0	± 0.0	60.0	± 0.0
Resting HR (bpm)	83	± 12.0	87	± 9.6	84	± 10.9	79	± 10.5	89	± 13.6	74	± 3.9
End HR (bpm)	165	± 18.3	160	± 15.3	166	± 14.4	163	± 16.0	168	± 15.5	155	± 6.3
HRmean (bpm)	148.5	± 18.0	146.6	± 10.3	151.7	± 16.2	146.1	± 13.3	151.4	± 12.0	139.3	± 7.5**
AUC (beats/min)	8612	± 958	8616	± 581	7749	± 1093	8488	± 771	8885	± 708	8153	± 433**
Resting Tre (°C)	37.3	± 0.5	37.3	± 0.4	37.4	± 0.3	37.5	± 0.3	37.7	± 0.4	37.6	± 0.3
End Tre (°C)	38.9	± 0.7	38.7	± 0.5	38.9	± 0.4	38.9	± 0.4	38.9	± 0.2	38.4	± 0.2**
End RPE	18.0	± 1.4	14.0	± 1.4**	16.0	± 2.0	16.0	± 2.5	14.8	± 2.0	13.0	± 1.3
End TS	7.8	± 0.3	7.4	± 0.5	7.4	± 0.4	6.9	± 0.7*	6.9	± 0.4	6.5	± 0.3*
SV (kg)	0.8	± 0.3	0.8	± 0.2	0.6	± 0.2	0.7	± 0.3	0.7	± 0.2	0.7	± 0.2
Dehydration rate (%)	1.1	± 0.3	1.1	± 0.2	1.0	± 0.4	1.2	± 0.6	1.0	± 0.3	1.1	± 0.4

Time: exercise duration time, HR: heart rate, End: After exercise, AUC: area under the curve, Tre: rectal temperature, RPE: rating of perceived exertion, TS: thermal sensation, SV: sweat volume, Pre: before the intervention, Post: after the intervention, *: $p < 0.05$ vs before the intervention, **: $p < 0.01$ vs before the intervention. Data displayed as mean $\pm$ SD.

4.2. 熱負荷テスト

熱負荷テストにおける、一定負荷運動時の結果を表 6 に示した。介入前後の運動継続時間では、CON 群および HWI₄₀ 群において有意な変化は認められなかった。一方、HWI₂₀ 群では、介入前と比べて介入後の運動継続時間が有意に長くなった($p < 0.05$)。安静時および運動終了時の心拍数において、CON 群および HWI₂₀ 群では、介入前後で差が認められなかった。運動中の平均心拍数では、CON 群および HWI₂₀ 群では介入前後で有意な変化が認められなかったのに対し、HWI₄₀ 群では、介入後の平均心拍数が有意に低下した($p < 0.01$)。また、熱負荷テストにおける心拍数の AUC (beats $\cdot$ min⁻¹)

では、CON 群および HWI₂₀ 群で介入後に有意な変化は認められなかったが、HWI₄₀ 群では有意に低下した($p < 0.01$)。

安静時における直腸温には、3 群ともに介入前後で有意な変化は認められなかった。運動終了時における直腸温では、CON 群および HWI₂₀ 群では有意な変化が認められなかった。一方で、HWI₄₀ 群では介入後に有意な低下が観察された($p < 0.01$)。

運動終了時の RPE は、CON 群では有意に低下したが($p < 0.01$)、HWI₂₀ 群および HWI₄₀ 群では変化は認められなかった。運動終了時における温熱感では、CON 群で介入後に有意な変化は認められなかったが、HWI₂₀ 群および HWI₄₀ 群では有意に低下した($p < 0.05$)。発汗量および脱水率には、3 群ともに介入前後での変化は認められなかった。

一定負荷運動時における、心拍数および直腸温の変化を図 3 および図 4 に示した。心拍数(図 3)では、CON 群では時間による有意な変化が認められなかった。一方で、HWI₂₀ 群では 55 分の時点において、有意な低下が観察された($p < 0.05$)。HWI₄₀ 群では 15 分から 45 分までの間、介入後に有意な低下が観察された($p < 0.05$)。直腸温(図 4)では、CON 群および HWI₂₀ 群では時間による有意な変化が認められなかった。HWI₄₀ 群では 35 分から運動終了まで、介入後に有意な低下が観察された($p < 0.05$)。

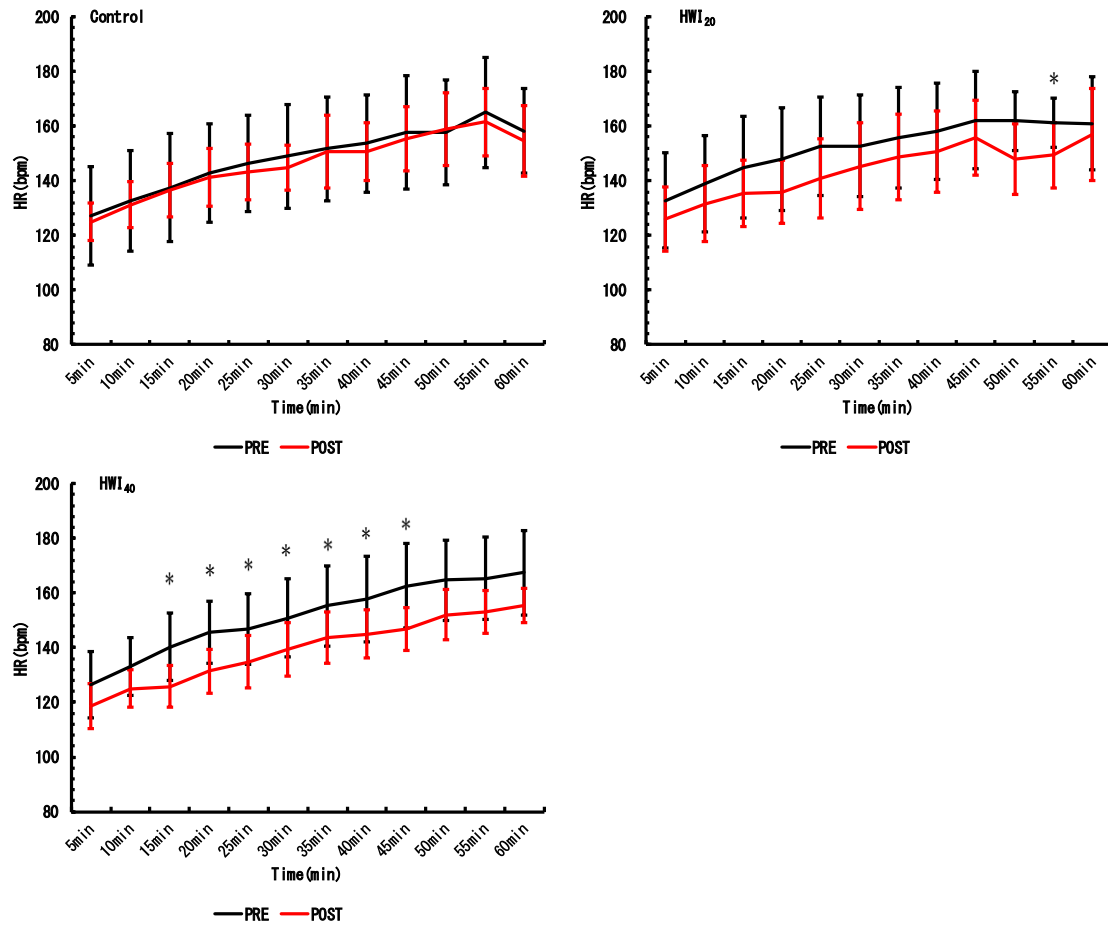


Figure 3. Changes in heart rate over time during thermal load test before and after the intervention.

HR: heart rate, *: $p < 0.05$ vs. before the intervention. Data displayed as mean $\pm$ SD.

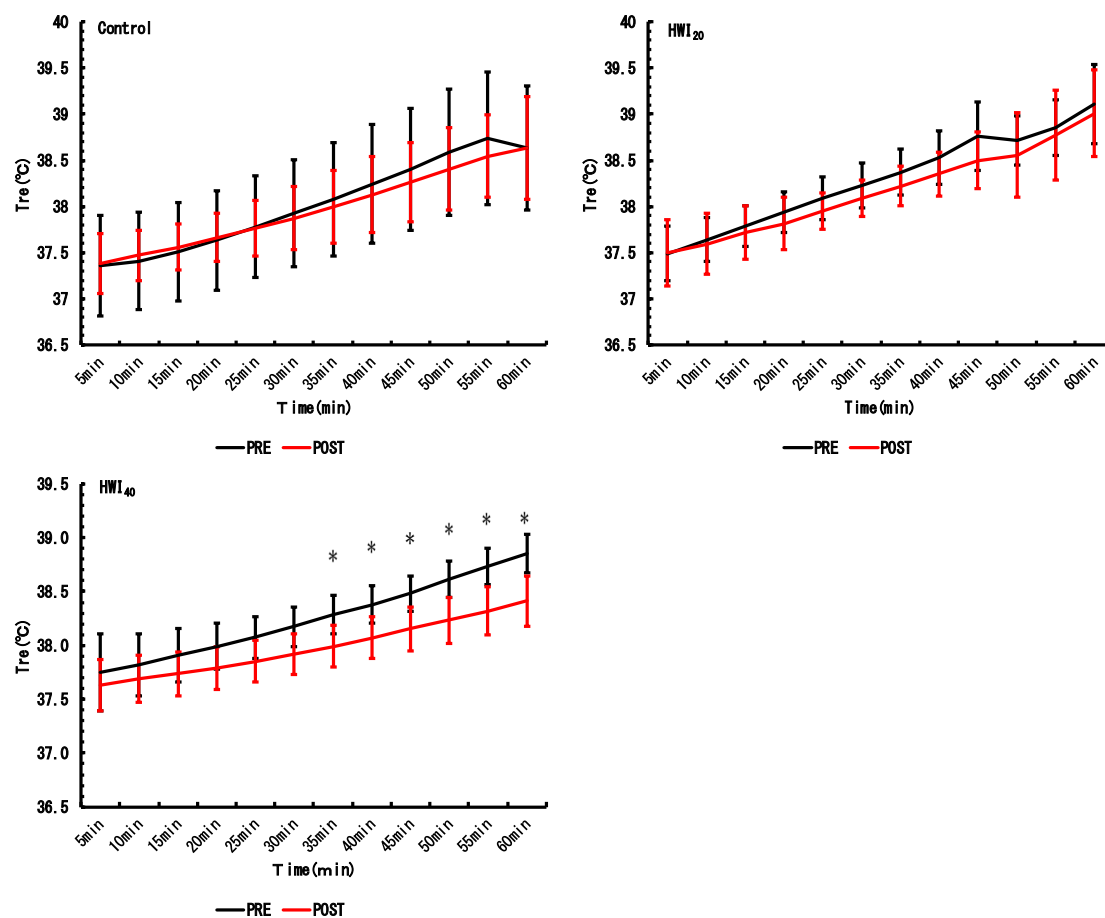


Figure 4. Changes in rectal temperature over time during thermal load test before and after the intervention.

HR: heart rate, *: $p < 0.05$ vs. before the intervention. Data displayed as mean $\pm$ SD.

熱負荷テストにおいて、3 群で最も短かった被験者の運動継続時間は 43 分であった (表 7)。そのため、全員のデータが揃う 40 分の時点において、統計的な解析を行うこととした。HWI₄₀ 群では、熱負荷テストの 40 分時点における心拍数および直腸温に介入後で有意な($p < 0.05$)低下が認められた。熱負荷テストの 40 分時点における RPE では、CON 群($p < 0.01$)および HWI₄₀ 群($p < 0.05$)において、介入後で有意な低下が認められ

た。また、熱負荷テストの 40 分時点における TS では HWI₂₀ 群において、介入後で有意な低下がみられた(表 8)。

Table 7. The time of thermal load test before and after intervention.

Time(min)	Trial					
	Control (n=4)		HWI ₂₀ (n=6)		HWI ₄₀ (n=6)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	56	60	49	60	60	60
2	60	60	60	60	60	60
3	60	60	43	58	60	60
4	60	60	45	60	60	60
5			55	60	60	60
6			60	60	60	60
Mean	59	60	52	59.7	60	60
SD	2.0	0.0	7.4	0.8	0.0	0.0

Time: exercise duration time, Pre: before the intervention, Post: after the intervention. Data displayed as mean $\pm$ SD.

Table 8. The results of thermal load test before and after intervention.

	Trial							
	Control (n=4)		HWI ₂₀ (n=6)		HWI ₄₀ (n=6)			
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
HR ₄₀ (bpm)	154 $\pm$ 17.9	151 $\pm$ 10.6	158 $\pm$ 17.6	151 $\pm$ 14.9	158 $\pm$ 15.5	145 $\pm$ 8.9*		
Tre ₄₀ (°C)	38.2 $\pm$ 0.6	38.1 $\pm$ 0.4	38.5 $\pm$ 0.3	38.4 $\pm$ 0.2	38.4 $\pm$ 0.2	38.1 $\pm$ 0.2*		
RPE ₄₀	15.8 $\pm$ 1.3	12.5 $\pm$ 1.0**	15.2 $\pm$ 1.7	13.8 $\pm$ 1.8	13.2 $\pm$ 1.7	12.2 $\pm$ 1.2*		
TS ₄₀	7.3 $\pm$ 0.5	6.8 $\pm$ 0.3	7.2 $\pm$ 0.5	6.3 $\pm$ 0.5**	6.8 $\pm$ 0.3	6.4 $\pm$ 0.4		

HR: Heart rate, 40: at 40minutes, Tre: rectal temperature, RPE: rating of perceived exertion, TS: Thermal sensation, Pre: before the intervention, Post: after the intervention, *: p < 0.05 vs before the intervention, **: p < 0.01 vs before the intervention. Data displayed as mean $\pm$ SD.

一方、介入前と介入後ともに、一定負荷運動後の漸増負荷を実施できた人数は、CON 群で 1 人、HWI₂₀ 群で 2 人、HWI₄₀ 群で 3 人であった。また、それぞれの試行群での

運動継続時間は、介入後で CON 群では 90 秒、HWI₂₀ 群では 220 秒、HWI₄₀ 群では 270

秒の増加がみられたが、例数が少ないために統計的な解析は行わなかった。(表 9)。

Table 9. The time of thermal load test before and after intervention.

Time(sec)	Control (n=1)		HWI ₂₀ (n=2)		HWI ₄₀ (n=3)	
ID	PRE	POST	PRE	POST	PRE	POST
1	390	480	750	960	480	720
2			330	660	150	540
3					330	510

PRE: before the intervention, POST: after the intervention.

第5章 考察

本研究では、6 日間に亘る常温環境下での運動トレーニングとその直後に行う 40 分間の温水浴との組み合わせによって、体温調節機能の向上および心血管系負担の減弱がもたらされた。一方で、運動トレーニングと 20 分間の温水浴の組み合わせでは、暑熱環境下での一定負荷運動時の運動継続時間を延長させたが、心拍数の AUC および生理的指標の変化は見られなかった。このことから、40 分間の運動と 20 分間の温水浴の組み合わせでは、体温調節機能および心血管系の適応を引き起こすには不十分であり、適応には 40 分間の運動後、少なくとも 40 分間の温水浴を行うことが必要であることが示唆された。HWI₄₀ 群において、体温調節機能および心血管系が改善された理由としては、介入期間における「直腸温が 38.5°C 以上を継続した時間」と「発汗量」の平均値が、他の 2 群よりも有意に高かったことが挙げられる。

これまでの暑熱馴化トレーニングでは、人工気候室を利用して、暑熱環境下での運動トレーニングを実施する必要があった。しかし、本研究で用いた方法により、人工気候室を有さない選手やチームの抱える問題を解決できるものと考えられる。先行研究では、実験のプロトコルとして、40 分間の運動とその直後の 40 分間の入浴により、その効果が確認されていたが、本研究の結果はそれを追認するものである。

しかし、40 分間の温水浴は被験者に大きな負担をかけることから、スポーツ現場においては実用的に欠ける方法であると言われている。そこで、本研究では、運動トレー

ニングと 20 分間の温水浴の組み合わせについて検討した。その結果、介入後の一定負荷運動時の運動継続時間を有意に増加させた(表 6)。しかし、介入前の熱負荷テストにおける HWI₂₀ 群の運動継続時間は、CON 群および HWI₄₀ 群の値と比べて低く、HWI₂₀ 群の運動パフォーマンスの改善には、このことが大きく影響したものと考えられる。

Zurawlew et al. (2016)による 6 日間に亘る常温環境下での運動と、その直後に行う温水浴の組み合わせが暑熱馴化に及ぼす影響を検討した研究では、熱負荷テスト(室温 33°C、湿度 40%)を実施した結果、心拍数($-0.6\text{beats} \cdot \text{min}^{-1}$)および運動終了時における直腸温(-0.36°C)が低下し、運動パフォーマンス($+4.9\%$)が向上することを示している。

しかし、スポーツ現場においては、気温が 33°C よりも高い温度で競技会が開催されることも珍しくないことから、本研究の熱負荷テストでは環境温度を 38°C に設定した。その結果、HWI₄₀ 群においては、運動パフォーマンスの向上については明確な結果が得られなかったものの、運動時の心拍数($-12\text{beats} \cdot \text{min}^{-1}$)および運動終了時の直腸温(-0.5°C)が低下した(表 6)。このことから、先行研究と同様の介入であっても、より高い環境温度での直腸温の上昇の抑制と心血管系への負担軽減が明らかとなり、高い環境温度でもこの方法は適用可能な方法であると言える。

一方で、運動パフォーマンスに対する明確な結果は得られなかった。その理由として、漸増負荷テストを実施できた人数が限られた(CON 群 1 名、HWI₂₀ 群で 2 名、HWI₄₀

群で 3 名)点が挙げられる。このことには、熱負荷テストにおけるプロトコルの違いあるいはより高い温度設定も影響していた可能性が考えられる。

短期間(< 7days)による伝統的な暑熱馴化トレーニングでは、暑熱環境下への曝露または運動トレーニングとの組み合わせが頻繁に行われている。その理由として、実際のスポーツ現場では、長期間の暑熱馴化トレーニングよりも実用性が高いという点が挙げられる。先行研究では、5 日間の熱曝露(環境温度 39.5°C、湿度 60%)によって、介入前と比べて介入後の運動終了時の心拍数と直腸温が低下し、35°C の環境下での運動継続時間を増加させることが示唆されている(Andrew et al. 2009)。また、4 日間に亘る暑熱環境下(環境温度 35°C、湿度 60%)での運動トレーニングによっても、運動中には心拍数と直腸温の平均値が低下し、運動パフォーマンスが向上することが報告されている(Willmott et al. 2016)。

これらと比較して、本研究でも、HWI₄₀ 群では、伝統的な短期間暑熱馴化トレーニングと同様の体温調節機能および心血管系の改善が得られたと思われる。本研究で行った常温環境下での運動と温水浴の組み合わせは、暑熱環境下でトレーニングを行うよりも、実用性が高く、生理的な負荷も少ないと考えられる。しかしながら、運動パフォーマンスを効果的に向上させるための常温環境下での運動と温水浴の組み合わせについては、さらなる検討が必要である。

本研究では、6 日間に亘る常温環境下での運動トレーニングとその直後に行う 40 分間の温水浴により、主観的指標の変化も観察された。介入前と比べて温熱感のスコアが減少し($p < 0.05$)、RPE のスコアも減少する傾向が見られた($p = 0.058$)。先行研究では、6 日間に亘る常温環境下での運動と、その直後に行う温水浴との組み合わせによって、運動パフォーマンステスト(室温 33°C、湿度 40%)を実施した結果、介入前と比較して温熱感および RPE のスコアが低下することが示唆されている(Zurawlew et al. 2018)。また、5 日間に亘る暑熱環境下(環境温度 40°C、湿度 50%)での運動トレーニングにより、温熱感のスコアは変化しなかったものの、RPE のスコアが低下することが示されている(Neal et al. 2016)。このことから、短期間暑熱馴化トレーニングと同様に、本研究の方法によっても、体に対する熱負担を減少させることが可能と言える。

ヒトの体温は一定の範囲内(36.0~37.5°C)に制御されているが、体温には日内変動がある。本研究では、介入前後における熱負荷テストの実施時間を統一したが、介入期間における運動トレーニングおよび温水浴の実施時間は統一していない。そのため、このことが、本研究の結果に影響を及ぼした可能性も考えられる。また、食事の摂取は、深部体温を上昇させることが知られている。しかしながら、本研究では、被験者の食事時間を規定しなかった。このこともまた、本研究の結果にわずかに影響した可能性が考えられる。加えて、運動の強度や入浴温度も暑熱馴化適応に影響を及ぼすことから、今後

は、暑熱馴化適応を引き起こすための最適な運動および温水浴の組み合わせについて、さらなる検討が必要である。

第6章 結論

本研究では、6日間に亘る常温環境下での運動トレーニングとその直後に行う20分間の温水浴により、暑熱馴化適応が起こらないことが示された。一方で、常温環境下での運動とそれに続く40分間の温水浴は、運動時の平均心拍数の低下、運動終了時の直腸温および温熱感の減少を引き起こすことが示された。これらのことから、暑熱馴化適応を引き起こすためには、常温環境下における40分間の運動に加えて、少なくとも40分間以上の温水浴が必要であると考えられる。

参考文献

1. American College of Sports Medicine. (2009): Nutrition and athletic performance. *Med. Sci. Sports Exerc* (41):709-731
2. Andrew TG., Goossens NG., Rehrer NG., Patterson MJ., Cotter JD. (2009) Induction and decay of short-term heat acclimation. *Eur J Appl Physiol* 107:659–670
3. Brazaitis M., Skurvydas A. (2010) Heat acclimation does not reduce the impact of hyperthermia on central fatigue. *Eur J Appl Physiol.* 109:771–778.
4. Brotherhood JR. (2008) Heat stress and strain in exercise and sport. *J Sci Med Sport.* Jan;11(1):6–19. Epub 2007 Nov 9
5. Casadio JR., Kilding AE., Cotter JD., Laursen PB. (2017) From lab to real world: heat acclimation considerations for elite athletes. *Sports Med.* 47(8):1467-1476.
6. Chalmers S., Esterman A., Eston R., Bowering KJ., Norton K. (2014) Short-term heat acclimation training improves physical performance: a systematic review, and exploration of physiological adaptations and application for team sports. *Sports Med. Jul;44(7):971-88.*
7. Galloway SD, Maughan RJ. (1997) Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1240–1249.

8. Gisolfi C, Robinson S. (1969) Relations between physical training, acclimatization, and heat tolerance. *J Appl Physiol.* May;26(5):530-4.
9. Hasegawa H. (2010) スポーツにおける 実践的暑さ対策とその応用. *NSCA JAPAN*
Volume 25, Number 6, pages 2-10
10. Hosokawa Y. (2018) Human health and physical activity during heat exposure.
Springer International Publishing.
11. Howe AS., Boden BP. (2007) Heat-related illness in athletes. *Am J Sports Med.*
Aug;35(8):1384-95.
12. Inoue Y., Kondo N. (2010) 体温 2 体温調節システムとその適応. *pages 186-190.*
13. Kazama A., Takatsu S., Hasegawa H. (2012) Effect of increase in body temperature on cognitive function during prolonged exercise. *Jpn J Phys Fitness Sports Med*
Volume 61 Issue 5 Pages 459-467.
14. Lee BJ., Mackenzie RWA., Valerie C., James RS., Thake CD. (2015) Human monocyte heat shock protein 72 responses to acute hypoxic exercise after 3 days of exercise heat acclimation. *BioMed Research International* *Volume 2015.*
<http://dx.doi.org/10.1155/2015/849809>

15. Leppäluoto J., Tuominen M., Väänänen A., Karpakka J., Vuori J. (1986) Some cardiovascular and metabolic effects of repeated sauna bathing. *Acta Physiol Scand.* 128(1):77-81.
16. Lorenzo S., Halliwill JR., Sawka MN., Minson CT. (2010) Heat acclimation improves exercise performance. *J Appl Physiol* 109: 1140–1147
17. Nadel ER., Pandolf KB., Roberts MF., Stolwijk JA. (1974) Mechanisms of thermal acclimation to exercise and heat. *J Appl Physiol. Oct*;37(4):515-20
18. Neal RA., Corbett J., Massey HC., Tipton MJ. (2016) Effect of short-term heat acclimation with permissive dehydration on thermoregulation and temperate exercise performance. *Scand J Med Sci Sports. Aug*;26(8):875-84.
19. Nielsen B., Hales JR., Strange S., Christensen NJ., Warberg J., Saltin B. (1993) Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J Physiol. Jan*; 460:467-85
20. Pearce AJ., Rowe GS., Whyte DG. (2012) Neural conduction and excitability following a simple warm up. *J Sci Med Sport. Mar*;15(2):164-8
21. Périard JD., Cramer MN., Chapman PG., Caillaud C., Thompson MW. (2011) Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Exp Physiol.* 96: 134–144.

22. Périard JD., Racinais S., Sawka MN. (2015) Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports. *Scand J Med Sci Sports*.25 (Suppl. 1): 20–38
23. Roberts MF., Wenger CB., Stolwijk JA., Nadel ER. (1977) Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J Appl Physiol*. 43: 133-137.
24. Scoon GS., Hopkins WG., Mayhew S., Cotter JD. (2007) Effect of post-exercise sauna bathing on the endurance performance of competitive male runners. *J Sci Med Sport*.10(4): 259-262
25. Stephens JM., Halson SL., Miller J., Slater GJ., Askew CD. (2017) Influence of body composition on physiological responses to post-exercise hydrotherapy. *J Sports Sci*.36(9):1044-1053
26. Stewart IB., Sleivert GG. (1998) The effect of warm-up intensity on range of motion and anaerobic performance. *Send to J Orthop Sports Phys Ther*.27(2):154-61
27. Sunderland C., Morris JG., Nevill ME. (2007) A heat acclimation protocol for team sports. *Br J Sports Med*.42:327–333

28. Tokizawa K., Lin CH., Nagashima K. (2012) Mechanisms of heat acclimation and tolerance induced by exercise training and heat exposure. *J Phys Fitness Sports Med.*1(2): 343-346
29. Tyler CJ., Reeve T., Hodges GJ., Cheung SS. (2016) The effects of heat adaptation on physiology, perception and exercise performance in the heat: a meta-analysis. *Sports Med.* 46(11):1699-1724.
30. Willmott AGB., Gibson OR., Hayes M., Maxwell NS. (2016) The effects of single versus twice daily short term heat acclimation on heat strain and 3000 m running performance in hot, humid conditions. *J Therm Biol.* 56:59–67
31. Zurawlew MJ., Walsh NP., Fortes MB., Potter C. (2016) Post-exercise hot water immersion induces heat acclimation and improves endurance exercise performance in the heat. *Scand J Med Sci Sports.* 26(7):745-54
32. Zurawlew MJ., Mee JA., Walsh NP. (2018) Heat acclimation by post-exercise hot water immersion in the morning reduces thermal strain during morning and afternoon exercise-heat-stress. *Int J Sports Physiol Perform.*19:1-6

謝辞

本修士論文は、筆者が早稲田大学スポーツ科学研究科修士課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。

本研究の遂行にあたり、御指導および御校閲をいただいた本学術院の村岡功教授に心から感謝いたします。村岡先生には、修士課程への進学を決意した私を温かく研究室に迎え入れて戴き、知識を深く考えることの重要性を教えて戴きました。

本学術院の坂本静男教授、彼末一之教授、人間科学学術院の永島計教授には、副査を引き受けて戴き、本論文に対する重要な意見をいただきました。心から感謝いたします。

また、永島教授は、実験を実施する際の人工気候室の利用を快諾して戴き、誠に感謝いたします。また、坂本教授は、実験を実施する際に機械の利用を快諾して戴き、誠に感謝いたします。

本学術院の河村拓史助教には、修士課程の2年間、日本語および修士論文について、御指導ならびに御助言を戴きました。心から感謝いたします。

実験にご協力いただいた村岡研究室の皆様と、実験に参加していただいた多くの被験者の方に感謝いたします。

最後に、日本の大学院に進学した私を理解し、支持してくれた両親に感謝の気持ちを申し上げます。