

論文題目

身体の温熱状態と運動パフォーマンスに

関する運動生理学的研究

－運動形態別検討－

Thesis Title

Exercise physiological study on exercise
performance and thermal state in human body:
differences in the type of exercise

井 上 恵 子

Inoue Keiko

京都工芸繊維大学

Kyoto Institute of Technology

目 次

| | | |
|-----|------------------------|----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 第1節 | 研究の背景 | 2 |
| | 体温と運動のパフォーマンス | |
| 第2節 | 体温上昇が運動のパフォーマンスにおよぼす影響 | 4 |
| | 1. 無酸素運動 | |
| | 2. 有酸素運動 | |
| | 3. 間欠的運動 | |
| 第3節 | 体温低下が運動のパフォーマンスにおよぼす影響 | 10 |
| | 1. 無酸素運動 | |
| | 2. 有酸素運動 | |
| | 3. 間欠的運動 | |
| 第4節 | 研究の課題と目的 | 13 |
| | 1. 今後の研究課題と意義 | |
| | 2. 研究目的 | |

| | | |
|-----|--|----|
| 第2章 | 活動筋温の違いが繰り返しスプリントサイクリングのパフォーマンスに およぼす影響 | 16 |
| 第1節 | 目的 | 17 |
| 第2節 | 方法 | 17 |
| | 1. 被験者 | |
| | 2. 事前測定 | |
| | 3. 実験手順 | |
| | 4. 測定項目 | |
| | 5. 統計処理 | |
| 第3節 | 結果 | 21 |
| | 1. 体温 | |
| | 2. パワー出力 | |
| | 3. 総発汗量 | |
| | 4. HR と RPE | |
| 第4節 | 考察 | 24 |
| 第5節 | 図表 | 29 |

| | | |
|-----|---|----|
| 第3章 | 下半身の加温または冷却が多段階運動テストのパフォーマンスと 生理的負担におよぼす影響 | 35 |
| 第1節 | 目的 | 36 |
| 第2節 | 方法 | 36 |
| | 1. 被験者 | |
| | 2. 事前測定 | |
| | 3. 実験手順 | |
| | 4. 測定項目 | |
| | 5. 統計処理 | |
| 第3節 | 結果 | 40 |
| | 1. 体温および貯熱量 | |
| | 2. GXT における生理的反応 | |
| | 3. GXT パフォーマンス | |
| 第4節 | 考察 | 42 |
| 第5節 | 図表 | 50 |
| 第4章 | 総括 | 55 |
| 第1節 | 本研究のまとめ | 56 |

| | |
|--------|----|
| 第2節 結論 | 57 |
| 謝辭 | 58 |
| 参考文献 | 59 |

構 成

本論文は以下の2編の原著論文から構成されている。

第2章構成

1. DIFFERENCES IN THE REPEATED SPRINT PERFORMANCE BETWEEN
THE FIRST AND LATTER HALVES OF TRIALS UNDER CONDITIONS OF
SEVERAL THERMAL STATES IN EXERCISING MUSCLES
KEIKO INOUE, NAOYUKI YAMASHITA, MASASHI KUME,
AND TETSUYA YOSHIDA

Journal of Strength and Conditioning Research 35: 782-790, 2021.

第3章構成

2. Changes in the physiological strain and graded exercise performance due to
warming or cooling of the lower body in a temperate environment
Keiko INOUE, Naoyuki YAMASHITA, Masashi KUME, Tetsuya YOSHIDA

The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 61: 18-26, 2021.

第1章

序論

第1節 研究の背景

体温と運動のパフォーマンス

第2節 体温上昇が運動のパフォーマンスにおよぼす影響

1. 無酸素運動

2. 有酸素運動

3. 間欠的運動

第3節 体温低下が運動のパフォーマンスにおよぼす影響

1. 無酸素運動

2. 有酸素運動

3. 間欠的運動

第4節 研究の課題と目的

1. 今後の研究課題と意義

2. 研究目的

第1節 研究の背景

体温と運動のパフォーマンス

運動のパフォーマンス（運動能力）は、運動時の核心温（脳や重要臓器などの温度、深部温ともいう）や活動筋の温度（筋温）に影響を受ける（Nybo et al 2001, Mohr et al., 2006）。筋温が安静時の値（およそ 35°C）を上回ると、筋のパワー出力は強化される（Bergh and Ekblom, 1979a; Sargeant, 1987）。障害予防やパフォーマンスの改善を目的として、主運動を行う前にウォームアップを行うことは、競技者はもとより一般にも広く受け入れられている。ウォームアップはその名前が示すとおり、体を温めて体温を上昇させることが大きな目的であり、その効果の生理学的背景の多くが体温の上昇に関連している（Bishop, 2003）。

一方で核心温の上昇は運動遂行が不可能になる体温（およそ 40°C）に到達するまでの時間を早めて長時間運動のパフォーマンスを低下させる（Gonzalez-Alonso et al., 1999; Nybo and Nielsen, 2001）。そのため長時間運動では、高体温を避けることが運動のパフォーマンス維持につながることになる（Nielsen et al., 1993）。

このように体温（核心温や筋温を含む）が運動のパフォーマンスに与える影響は、筋のパワー出力（無酸素運動）や長時間運動（有酸素運動）、或いはその両方が含まれる間欠的運動など運動形態により異なることが考えられるが、全ての運動形態において高

いパフォーマンスを発揮できる体温に関して明確な知見が得られていない。これらが明らかになれば、障害予防やパフォーマンスの改善を目的として主運動の前に行われているウォームアップ（準備運動）や、暑熱環境で取り入れられる運動前身体冷却（プレクーリング）において運動形態別に目安となる体温を示すことができる。そのため身体の温熱状態と運動形態別のパフォーマンスとの関係を運動生理学的に明らかにする必要がある。

第2節 体温上昇が運動のパフォーマンスにおよぼす影響

1. 無酸素運動

無酸素運動とは、主に無酸素的過程からエネルギーを供給して行う高強度な運動で、具体的には陸上の跳躍競技や投てき競技、100m走、200m走、400m走、重量挙げや野球のバッティングも無酸素運動に分類できる。10秒以内で終了する最大努力のダッシュや自転車漕ぎ（以下、これらの運動をスプリントと呼ぶ）は典型的な無酸素運動である。

動的短時間運動（例えば、ジャンプやスプリント、筋のパワー出力など）のパフォーマンスは、高温環境や受動的加温またはウォームアップ（運動前に行う準備運動）により向上する（Sargeant, 1987; Bishop, 2003; Yaicharoen et al., 2012）。Sargeant（1987）は44°Cの浸水浴で脚の筋温を39.3°Cに上昇させ、最大筋力と20秒間の最大自転車漕ぎ運動のピークパワーが、安静時（筋温36.6°C）と比較し11%向上したことを報告している。Linnane et al.（2004）は温水浴により体温を1°C上昇させ、30秒間の全力自転車漕ぎ運動のパワー出力の向上を報告している。Bergh and Ekblom（1979a）は、筋温1°Cの上昇はジャンプパフォーマンスを4.2%、スプリントサイクリングの速度を4.4%向上させ、動的短時間運動と筋温に正の相関があることを示した。RacinaisとOksa（2010）は筋温1°Cの上昇は、筋収縮の種類と速度に応じてパフォーマンスを2%～5%

向上させることを示した。さらに筋温 34.2 °Cと比較し、37.5 °Cで骨格筋の ATP ターンオーバーと筋線維伝導速度が速まる (Gray et al., 2006)。このように無酸素運動のパフォーマンスを決定する上でもっとも重要な要素は筋温であると考えられる (Bishop, 2003; Racinais and Oksa, 2010)。筋温の上昇は ATP やクレアチンリン酸、グリコーゲンの分解を促進させ (Febbraio et al, 1996), 無酸素性 ATP 供給率を向上させる (Edwards et al, 1972)。また筋や関節の粘性抵抗を軽減させるため (Wright, 1973), より少ないエネルギーで筋収縮が可能になると考えられる (deVries and Housh, 1994)。そのため筋温の上昇はスプリントのパフォーマンス向上につながるが、一方で代謝を亢進させ疲労を加速させる (Febbraio et al., 1996; Thornley et al., 2003) ことにもなる。

2. 有酸素運動

主に有酸素的過程からエネルギーを供給して行う運動を有酸素運動という。比較的長時間の持久的な運動である場合が多く、多種多様である。有酸素性作業能力（作業時間や作業量の程度）を評価するための一般的なテストに文部科学省が 2001 年に新体力テストに取り入れた 20m シャトルランテストがある。20m シャトルランテストの負荷は多段階漸増負荷テスト (Graded exercise test, GXT) の様式である。最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\text{max}$) の測定も GXT の様式で行われることが多い。

体温が上がりやすい暑熱環境では、最大運動時 (Gonzalez-Alonzo et al., 2003;

Lafrenz et al., 2008; Wingo et al., 2005) における最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) や身体作業能力の低下, また最大下運動時 (Ely et al., 2010; Periard et al., 2011; Tucker et al., 2006; Tyler et al., 2008) における疲労困憊に至るまでの時間 (Time to exhaustion, TTE) の短縮や, 一定作業量の完了に要する時間の延伸など, 有酸素運動のパフォーマンスを低下させる多くの報告がある. これは核心温の上昇が貯熱容量を減少させ, 運動遂行が不可能になる体温 (およそ $40^{\circ}C$) に到達するまでの時間を早めてしまうためである (Gonzalez-Alonso et al., 1999; Nybo and Nielsen, 2001).

有酸素運動では, 核心温がパフォーマンスの制限要因となるため, 核心温や皮膚温を測定している研究は多いが, 筋温を報告している研究は極めて少ない. Gregson et al. (2002) は, 受動的な加温とウォームアップにより, $70\% \dot{V}O_{2max}$ の運動負荷による TTE の大幅な減少を報告している. この研究における運動開始時の筋温と直腸温はそれぞれ, コントロール ($34.9^{\circ}C, 37^{\circ}C$), 受動的加温 ($37.4^{\circ}C, 38^{\circ}C$), ウォームアップ ($37.3^{\circ}C, 37.9^{\circ}C$) であった. 彼らは, 核心温の上昇に加え, 筋温の上昇も疲労を早めた可能性を示唆している.

体温の上昇が GXT のパフォーマンスに与える影響を報告している研究は限定的である. 2つの研究が GXT における $\dot{V}O_{2max}$, ピークパワー (Peak power output, PPO), そして TTE を報告している. GXT の運動時間は 20 分未満 (Aleksander et al., 2010) と, 約 32 分 (Smolander et al., 1986) で, $37^{\circ}C$ 以上の高温環境で行われた GXT のパ

パフォーマンスは、25°Cの環境と比較して損なわれることはなかった。最近の研究では、15分間のウォームアップ運動が酸素摂取量のピーク値 ($\dot{V}O_{2peak}$) と PPO を増加させることを報告している (Danek et al., 2019)。したがって、環境温度が高いと GXT のパフォーマンスが低下することはないようだが、ウォームアップによる核心温と筋温の上昇は、中性温環境での GXT のパフォーマンスを向上させる可能性がある。しかし、Danek et al. (2019) は体温を測定していないため、パフォーマンスの向上は体温上昇が主な原因か、あるいはウォームアップによる生理的な運動誘発性変化に由来するかどうかは不明である。そのため、活動筋温の上昇自体が中性温環境での GXT のパフォーマンスに影響を与えるかどうかを明らかにするために、活動筋を 70% $\dot{V}O_{2max}$ での TTE の大幅な減少が観察された 37.4°C程度に受動的に加温する必要がある。

3. 間欠的運動

高強度の無酸素運動を断続的に繰り返す運動を間欠的運動という。間欠的運動には、高強度の運動の間に低強度の運動をはさんで行う運動（断続的スプリント, Intermittent-sprint) や、完全休息をおいて高強度の運動を繰り返す（繰り返しスプリント, Repeated-sprint) 運動がある。運動の強度や時間、休息时间やその間隔など組み合わせは無数にある。間欠的運動のエネルギー供給は、無酸素的過程と有酸素的過程の両方から得られる (Bangsbo et al., 2001; Gaitanos et al., 1993)。断続的スプリントは比較

的長時間運動が多く、繰り返しスプリントは 60 秒以内の休息をはさんで 10 秒以内のスプリントを数回繰り返すような、数分で終わる運動が多い。

Drust et al. (2005) は、40°C の高温環境で 40 分間の間欠運動を行い、食道温 (39.5°C) と筋温 (40.2°C) を上昇させた後に、20°C の環境と比較して、繰り返しスプリント運動 (15 秒のスプリントを 15 秒の回復をはさんで 5 回負荷) の大きなパワー低下を報告した。高体温ではない場合 (運動終了時の核心温 38.1°C)、暑熱環境での繰り返しスプリント運動 (6 秒のスプリントを 30 秒の回復をはさんで 10 回負荷) の平均ピークパワーは 3.1% 改善された報告があるが (Girard et al., 2013)、暑熱環境は繰り返しスプリントのパフォーマンスに影響を与えなかった報告もある (Almudehki et al., 2012)。直腸温 (約 37.4°C) が 2 つの環境条件で同程度であった場合、自転車での繰り返しスプリント運動 (6 秒のスプリントを 30 秒の積極的な回復をはさんで 4 回負荷) の PPO は、暑熱曝露 (気温 40°C、相対湿度 20%) の影響を受けていない (Matsuura et al., 2015)。極めて高い核心温が、高温環境での繰り返しスプリントパフォーマンスの制限要因になるかもしれないが、筋温と核心温が繰り返しスプリントパフォーマンスにおよぼす影響については、実験プロトコル、身体の温熱状態や環境温などの違いにより統一した見解は得られていない。

筋温の上昇は、運動中のクロスブリッジサイクリングの速度を速めるため (Linnane et al., 2004)、疲労を促進し (Febbraio et al., 1996)、その後パワーは低下する (Lee et

al., 1997). これを裏付ける報告として、全身加温により核心温を 1°C 上昇させると、1 回目の試行（トライアル）では 30 秒スプリントサイクリングのパワーが向上したが、2 回目のトライアルではパワーの向上はみられていない (Linnane et al., 2004). Beaven et al. (2018) は下半身に保温服を着てウォームアップを行い、30 秒間隔で 40m の全力疾走を 5 回繰り返したところ、コントロールと比較し 1 回目から 3 回目までのスプリントパフォーマンスを改善したが、4 回目と 5 回目のトライアルでは大きくパフォーマンスを低下させた。彼らは直腸温を測定しているが、数値の報告がなく、グラフから推測するとコントロールと比較し、おおよそ 0.5°C (2 回目のトライアル) の上昇であろう。しかし筋温は測定していないので、活動筋温の上昇が繰り返しスプリントのパフォーマンスにどのような影響を与えるか不明である。また、繰り返しスプリントの前に 10 分間のウォームアップを行っているため、5 回目のトライアルでみられたパフォーマンスの低下は疲労の影響か温度の影響か不明である。これらを明らかにするために、スプリントパフォーマンスの向上が期待できる安静値以上の筋温 (36°C) と、骨格筋の ATP ターンオーバーと筋線維伝導速度が速まる 37.5°C 程度まで受動的に筋を加温し、核心温と活動筋温上昇の影響を検討する必要がある。

第3節 体温低下が運動のパフォーマンスにおよぼす影響

1. 無酸素運動

Bergh and Ekblom (1979a) は、筋温 1°C の低下は最大動的筋力、パワー出力、ジャンプ高などの無酸素運動のパフォーマンスを 4%~6% 低下させることを報告している。Oksa et al. (1997) は、20°C, 15°C, 10°C に設定した人工気象室で筋温をそれぞれ 32°C, 31°C, 29.5°C に低下させた時のジャンプ滞空時間は、27°C の環境 (筋温; 32.9°C) と比較して低下し、筋温 1°C あたりのパフォーマンスの低下率はそれぞれ、17%, 8.4%, 7.6% だったことを報告している。筋温の上昇が動的短時間運動のパフォーマンスを向上させるのと反対に、安静値以下の筋温 (およそ 34°C) は、スプリント (Bergh and Ekblom, 1979a; Sargent, 1987; Ball et al., 1999) やジャンプ (Bergh and Ekblom, 1979a) などの無酸素運動のパフォーマンスを低下させる。

2. 有酸素運動

Bergh and Ekblom (1979b) は 8 分以内に疲労困憊に至るように設定された腕と脚を組み合わせた運動プロトコルを行い、 $\dot{V}O_{2peak}$ は食道温と筋温の両方に正の相関があり、食道温 1°C の低下は、最大有酸素能を 5% から 6% 低下させることを示した。さらに食道温 37.5°C 以下、筋温 38°C 以下では、 $\dot{V}O_{2max}$ に到達しなかったことを報告してい

るがこれは運動終了時の値であるため、運動開始時の体温の状態（核心温や筋温）はわかっていない。筋温が低いと、ヘモグロビンとミオグロビンの両方の濃度が低下することで細胞の代謝が低下し、解糖系酵素の活性も低下する（Febbraio et al., 1996; Yanagisawa et al., 2007）。さらに筋や腱の粘性抵抗を高めてしまう（Wright, 1973）。これらは、体温が低いと有酸素および嫌気性のエネルギー供給が損なわれ、GXT パフォーマンスが低下することを示唆する。実際、核心温の低下により 18°C の水浸条件での GXT 中の TTE と最大作業負荷が減少したことが報告されている（Fujimoto et al., 2016）。中性温環境における水循環スーツに 10° C の水を灌流して受動的に身体を冷却した研究では、VO₂peak、TTE、また PPO を損なうことはなかったと報告している（Imai et al., 2018）。したがって、核心温や筋温の低下が中性温環境での GXT パフォーマンスにおよぼす影響については一致した見解が得られていない。

3. 間欠的運動

冷水浸や、アイスベスト、アイスパック、細かく砕いた氷摂取、またはそれらの混合法による運動前身体冷却が、間欠的運動のパフォーマンスを向上させるいくつかの報告（Castle et al., 2006; Duffield et al., 2007; Minett et al., 2012）があるが、ほとんどが長時間の断続的スプリント（Intermittent-sprint）の影響を検討している研究ばかりである。体温低下が繰り返しスプリントパフォーマンスにおよぼす影響を報告した研究は知

るところ1つだけである (Beaven et al., 2018). その研究では, シャーベット状の氷を摂取し, 30秒間隔で40mの全力疾走を5回繰り返す, コントロールと比較し1回目と2回目のスプリントパフォーマンスを低下させたが, 反対に最後のトライアル(5回目)ではパフォーマンスの向上を報告している. 運動開始時の直腸温はコントロールと同程度であったが, 2回目のトライアル以降直腸温の低下がみられた. グラフから推測するとコントロールと比較しおおよそ 0.4°C の低下である. しかし筋温を測定していないので, 活動筋温の低下が繰り返すスプリントのパフォーマンスにどのような影響を与えるか不明である. そこで安静値以下の筋温 34°C と, 明らかにスプリントのパフォーマンスを低下させると思われる 32°C 程度にまで筋を冷却して, 核心温と活動筋温低下の影響をみる必要がある.

第4節 研究の課題と意義・研究目的

1. 今後の研究課題と意義

先行研究の検証より、体温、特に筋温の上昇は運動を行った環境が高温でない場合、生理学的メカニズムから推察すると運動パフォーマンスを向上させるようである。さらに筋温の低下は運動パフォーマンスを低下させる報告が多い。しかし、多くの研究は実験条件として対照（コントロール）条件と高温条件または低温条件、あるいは高温と低温の2条件を設定して核心温や筋温の上昇・低下と運動パフォーマンスとの関係を見ている。

核心温や筋温が運動パフォーマンスに与える影響を運動形態別にみると、無酸素性運動については筋温とパフォーマンスとの関係が多く報告されているが、有酸素運動では核心温がパフォーマンスの制限要因となるため、筋温を報告している研究は少なく、特に有酸素性運動能力を評価するためのGXTのパフォーマンスにおよぼす筋温の影響については不明な点が多い。GXTを用いた研究では、筋温を上昇させるためにウォームアップを用い、ウォームアップの有無でパフォーマンスを比較している。このような実験プロトコルでは、ウォームアップによる生理的な運動誘発性変化と筋温上昇の両方がパフォーマンスに影響を与えている可能性があるために、筋温上昇のみの影響を分離することは出来ない。したがって活動筋のみを受動的に加温した状態で、核心温が上昇しやすい高温環境を避け、中性温度域内で実施するGXTのパフォーマンスに筋温がどの

ように影響しているかを明らかにする研究が必要である。GXT から得られるパフォーマンス ($\dot{V}O_{2\max}$ や $\dot{V}O_{2\text{peak}}$, あるいは $\dot{V}O_{2\max}$ 時のスピードや 20 m シャトルランテストで得られるラップなど) は, トレーニング強度の決定や, その達成度を評価するための有用な指標となる (Åstrand, 1986; Billat et al., 1999; Paradisis et al., 2014) . したがって, その精度を向上させるためにも同じ被験者に対して広範囲の活動筋温と核心温が GXT のパフォーマンスにおよぼす影響を調べることは, 正確に GXT のパフォーマンスを測定するための温熱状況や環境条件の設定に役立つ。

間欠的運動, 特に繰り返しスプリントにおいても筋温を測定している研究が少なく, 活動筋温の上昇が繰り返しスプリントのパフォーマンスにどのような影響を与えるか不明である。単発のスプリントでは, 高い筋温がパフォーマンスの向上に役立つが, 繰り返すことで, その影響が変わる可能性がある。サッカー, ラグビー, バasketボール, など多くのボールゲームでは, いわゆるスプリントが短い間隔で何度も繰り返される。それゆえ, 後続のスプリントにおけるパフォーマンスの回復や再現する能力, すなわち繰り返しスプリント能力は, これらの種目に従事する競技者の重要な体力要件となる (Girard et al., 2011; Spencer et al., 2005)。そこでスプリントパフォーマンスの向上が期待できる安静値以上の筋温 (36°C) や, 骨格筋の ATP ターンオーバーと筋線維伝導速度が速まる 37.5°C程度, さらに安静値以下の筋温 34°Cと, 明らかにスプリントのパフォーマンスを低下させると思われる 32°C程度に筋を受動的に加温・冷却し,

核心温と活動筋温の変化がスプリントのパフォーマンスにおよぼす影響を明らかにする必要がある。

このように GXT や繰り返しスプリント運動やパフォーマンスに対する体温や活動部位の温熱状態の影響を明らかにすることは、それぞれの運動のパフォーマンス発揮に適した筋温を示すことができ、ウォームアップを行う時の目安となる。

2. 研究目的

本研究では、間欠的運動である繰り返しスプリントサイクリング (Repeated sprint cycling, RSC ; 第 2 章) と有酸素運動である GXT (第 3 章) を研究対象として水循環ズボンを使用して下半身を加温・冷却する 4 つの温度条件を設定し、それぞれの運動形態で発揮されるパフォーマンスにおよぼす身体の温熱状態の影響を明らかにすることを目的とする。

第2章

活動筋温の違いが繰り返しスプリントサイクリングのパフォーマンスにおよぼす影響

第1節 目的

第2節 方法

第3節 結果

第4節 考察

第5節 図表

第1節 目的

本研究の目的は、活動筋を低温から高温まで変化させて繰り返しスプリントサイクリング (repeated sprint cycling, RSC) を実施した場合の、運動パフォーマンスに与える身体の温熱状態の影響を明らかにすることである。

第2節 方法

1. 被験者

本研究の被検者は 9 名の男子大学生であった。被験者の身体的特徴 (平均±標準誤差, standard error; SE) は、年齢 23.0 ± 0.4 歳、身長 172 ± 2 cm、体重 61.4 ± 2.2 kg、大腿と下腿の平均皮下脂肪厚 5.0 ± 0.5 mm (ノギス型脂肪計 [MK-60] を用いて測定)、体脂肪率 $12.5\% \pm 0.7\%$ (皮下脂肪厚より Nagamine and Suzuki [1964]の式から算出) であった。実験を行うにあたり、被験者に実験の目的および危険性についての十分な説明を行い、同意を得た。本研究は、京都工芸繊維大学倫理委員会の承認 (受付番号 2009-01) を得て行った。

2. 事前測定

本実験時における運動負荷を決定するために、本実験の 1 週間以上前に電気ブレーキ式サイクルエルゴメーター (POWERMAX-VII; COMBI) を用いて最大無酸素性パワ

ー (Maximum anaerobic power, MAP) テストを実施し、得られたピークパワーの 60% 負荷を本実験での負荷値とした。

3. 実験手順

被験者には実験室来室時刻の 24 時間前から激しい運動を、17 時間前から塩分の多い食べ物やアルコール、カフェインの摂取を、さらに 3 時間前から食事の摂取を禁止し、本実験当日 12 時に被験者を実験室に来室させた。被験者には脱水を避けるために 200-300ml の水分摂取を許可し、10g 精度の体重計 (FW-100K ; AND) を用いて裸体で体重を測定した。被験者は上半身に長袖 T シャツ、下半身に競泳用パンツを着用し、全ての測定機器を取り付けた上で水循環ズボン (Microclimate systems; Delta Temax, Inc., Canada, Figure2-1) を着用した。大腿および下腿の目標温度は、32°C(COLD), 34°C(COOL), 36°C(WARM) および 38°C(HOT) とした。そのため低温恒温水槽 (LTB-400; 井内) を用いて、水循環ズボンに還流する水温を、6°C(COLD), 17°C(COOL), 30°C(WARM), 44°C(HOT) に設定した。

被験者を 30 分間の椅座安静にさせた後、大腿と下腿の深部温 (Temperature of thigh [Tmt] or calf [Tmc] muscle) の記録を開始した。記録開始の 5 分後にシールレススキヤンモーターポンプ (UPS 25-8-JA ; Grundfos) を使用して 0.6 L/分で水を水循環ズボン内に循環させ、下肢の冷却または加温を行った。Tmt と Tmc が目標温度より 0.5°C

低い値（その後のウォームアップ運動による筋温の上昇に対応するため）に達したところで、MAP テストで使用した自転車エルゴメーターに移動し、3 分間のウォームアップ（出力 120W, 1.5kp, 80rpm）を行った。COLD, COOL, WARM の各温度条件でのウォーミングアップ運動後の Tmt と Tmc の平均値（Mean temperature of Tmt and Tmc, Tmm）と目標温度との差は $\pm 0.07^{\circ}\text{C}$ 以内であった。しかし HOT 条件においては、ウォーミングアップ前の水循環中（ 44°C ）に Tmt と Tmc は約 37.2°C でプラトー状態になったため、ウォームアップ後の Tmt と Tmc の目標温度との差の平均値は、 $0.6 \pm 0.11^{\circ}\text{C}$ であった。被験者はウォームアップの 3 分後、8 秒間の全力自転車漕ぎ運動（以下、スプリント）を 40 秒間の休息を挟んで 8 回行った。被験者にはペダリング時に腰を浮かさないよう、またペース配分をせず全力で漕ぎ続けるよう指示した。負荷は、予備実験で行った最大無酸素性パワーテストでのピークパワー出現時負荷の 60% 強度とした。

実験は気温 $24.8 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $52\% \pm 1\%$ の中性温環境で行った。また、各温度条件につき 5 日以上の間隔を空け、ランダムに実施した。

4. 測定項目

運動中の Tmt と Tmc は、深部体温計（コアテンプ CM-210；テルモ）を用いて測定した。この深部体温計は、zero-heat-flow（ZHF）法（Fox et al., 1973; Matsukawa et

al., 1996; Yamakage et al., 2003) によるもので、この方法で測定された深部組織温は、深さ 18mm の筋温と高い相関があることが報告されている (Matsukawa et al., 1996) . また、体温の急激な変化にもよく追従することが確認されている (Fox et al., 1973) . 本研究ではこの方法を用いて深部組織温を測定して筋温を推定した。被験者の膝蓋骨から 10cm 上部の右外側広筋 (Tmt) と腓腹筋筋腹中央部 (Tmc) に直径 4.3cm の深部体温計のセンサーエレメント (CM-210 PD1;テルモ) をテープで固定した。センサーは 4 つの実験条件すべてで同じ位置に取り付けた。なお水循環ズボンのチューブとの接触を防ぐために、センサーの上部を断熱材で覆った。Tmt および Tmc の測定は、実験を通して 30 秒毎に記録した。鼓膜温 (Tympanic temperature, Tty) は、赤外線鼓膜温度計 (3000A; Genius, Argyle) を使用し、水循環前、ウォームアップ前、RSC の開始時と終了時、および RSC 終了 10 分後まで測定した。Tty は 3 回測定し、データは 3 回の平均値として示した。8 秒間のスプリント中のピークパワー (Peak power output, PPO) と平均パワー (Mean power output, MPO) は、パワー出力とペダル回転数を 0.1 秒ごとに測定し決定した。各試行 (トライアル) の前半 (スプリント番号 1~4) とトライアルの後半 (スプリント番号 5~8) , および全て (スプリント番号 1~8) の総仕事量 (Sum of work output, SWO) の合計は、以下の式 (1) より求めた。

$$SWO = \Sigma (MPO \times 8 \text{ 秒}) \times 10^{-3} \quad (1)$$

総発汗量は、10 g 精度の体重計 (FW-100K; A&D) を使用し、運動前後の裸体重か

ら決定した。心拍数（Heart rate, HR）は、心拍数モニター（RS400; Polar）を使用し、ウォームアップ前から1秒間隔で連続して測定した。主観的運動強度（Rate of perceived exhaustion, RPE）は、ウォームアップの前後、回復期間中（各スプリントの直後）、および運動10, 20, 30分後にボルグスケールを使用して記録した（Onodera and Miyashita, 1976）。

5. 統計処理

結果は全て平均値±標準誤差で示した。統計解析は統計処理ソフト SPSS. ver. 16.0 for Windows を用いて行った。正規性の検定は、Kolomogorov-Smirnov test を使用した。4 温度条件間の Tmt, Tmc, Tmm, Tty, PPO, MPO, HR, および RPE は二元配置分散分析（条件×時間）を行い、有意差があった場合は Bonferroni の post-hoc を用いて下位検定を実施した。前半4本のSWO、後半4本のSWO、および全8本のSWO、総発汗量は一元配置分散分析を行った。有意水準は5%未満とした。

第3節 結果

1. 体温

4 条件における Tmt と Tmc, および Tmm の変化を Figure2-2 に示した。水循環前の Tmt, Tmc, および Tmc に温度条件間に有意差はなかったが、水循環後は有意差を

示した ($p < 0.01$) . COLD, COOL, WARM, HOT の各温度条件における目標温度に到達するまでの時間はそれぞれ 119 ± 6.3 分, 112 ± 6.0 分, 61 ± 1.2 分, 76 ± 3.8 分であった. 筋温は, すべての温度条件で RSC によりウォームアップ (Warm-up, W-up) 開始時の値から有意に上昇した ($p < 0.05$) . 実験を通じて Tmt, Tmc および Tmm の 4 温度条件間に有意差があったが, COLD および COOL 条件での RSC 中の筋温の上昇率は WARM 条件および HOT 条件よりも大きかった.

水循環前の T_{ty} は 4 温度条件で $36.3 \sim 36.5^{\circ}\text{C}$ の範囲であり, T_{ty} に統計的な有意差はなかった. 各温度条件における T_{ty} の安静時からの変化度 (ΔT_{ty}) の経時変化を Figure2-3 に示した. COLD および COOL 条件の ΔT_{ty} は, W-up 開始から RSC 開始 (それぞれ $p < 0.01$) および RSC 終了まで (それぞれ $p < 0.001$) で有意に減少した. HOT 条件での ΔT_{ty} は運動終了 10 分後まで有意な上昇を示した ($p < 0.05$) . 一方で, WARM 条件の ΔT_{ty} は 実験中に有意な変化はなかった.

2. パワー出力

Figure2-4 に 4 条件における各スプリント中の PPO, MPO を示した. 各条件ともに, 最初のスプリントにおいて PPO と MPO の最高値が観測され, スプリント回数に応じて徐々にその値は減少した. 前半のスプリント (スプリント番号 1 ~ 4) では, WARM と HOT 条件の PPO は COLD と COOL 条件に比べて有意に高かったが ($p <$

0.05), 後半のスプリント (スプリント番号 5~8) では各温度条件間に統計的な差はなかった。また PPO と MPO は 2 回目のスプリント以外に WARM と HOT 条件間に有意な差はなかった。

Figure2-5 に各温度条件における SWO を示した。前半のスプリントでは HOT (17.56 ± 0.92 kJ) および WARM (17.17 ± 0.998 kJ) 条件が COOL (16.48 ± 0.88 kJ) および COLD (15.6 ± 0.77 kJ) 条件よりも有意に高かったが (それぞれ $p < 0.05$) , 後半のスプリントでは 4 温度条件間の有意な差はなかった。また, HOT 条件における全スプリントの SWO (Figure2-5 の "Total") は 32.02 ± 1.78 kJ で, COOL (30.25 ± 1.69 kJ) や COLD (28.96 ± 1.53 kJ) 条件よりも有意に高かった (それぞれ $p < 0.01$)。また WARM 条件における SWO (31.41 ± 1.91 kJ) も COLD と比較し有意に高かった ($p < 0.01$)。しかし WARM と HOT 条件間の SWO に有意差はなかった。

3. 総発汗量

HOT (0.23 ± 0.025 kg/h) 条件の総発汗量は, WARM (0.17 ± 0.014 kg/h), COOL (0.09 ± 0.005 kg/h, $p < 0.001$) , COLD (0.08 ± 0.003 kg/h, $p < 0.001$) 条件と比較して有意に多かった (それぞれ $p < 0.001$)。WARM 条件の総発汗量も, COOL および COLD 条件と比較し有意に多かった ($p < 0.01$, $p < 0.001$)。

4. HR と RPE

4 温度条件における各スプリント時のピーク HR と RPE を Figure2-6 に示した。HOT 条件におけるピーク HR と RPE は COOL, COLD 条件と比較して有意に高かった（それぞれ $p < 0.05$ ）。しかし HOT と WARM 条件には有意な差はなかった。

第4節 考察

本研究は水循環ズボンを使用して COLD から HOT まで活動筋温を変化させ、RSC 時の生理的変化と作業パフォーマンスにおよぼす影響を評価した。本研究の新たな発見は、RSC パフォーマンスにおける活動筋温の影響は、RSC の後半よりも前半が大きいことである。HOT 条件の RSC パフォーマンス (PPO, MPO, SWO) は、RSC 前半で高かったが、核心温の上昇と発汗量が増加し、HR, RPE は RSC を通して高いことなどから、生理的負担は HOT 条件で高かった。これらが疲労を引き起こし、RSC 後半のパフォーマンス低下につながった可能性がある。

本研究における Tmt と Tmc は、深部体温計 (Coretemp CM-210) を使用して ZHF 法で推定した (Fox et al., 1973; Matsukawa et al., 1996; Yamakage et al., 2003)。筋温は測定部位の深さに依存するが (Racinais and Oksa, 2010)、ZHF 法は皮膚表面から深さ 18mm 部位の温度を反映すると報告されており (Matsukawa et al., 1996)、この方法はいくつかの研究で使用されている (Muravchick et al., 1983; Takizawa et al., 2018)。

本研究の被験者の大腿部と下腿部の平均皮下脂肪厚は $5.0 \pm 0.5\text{mm}$ であるため、筋温を絶縁するほどの皮下脂肪厚ではない。したがって ZHF 法によって測定される筋温は、大腿および下腿の筋温変化を反映している。

Tmt と Tmc は全ての実験条件で RSC 中に増加した。前半の SWO は COLD・COOL 条件が WARM・HOT 条件よりも低かったが、COLD・COOL 条件における Tmt・Tmc の上昇は WARM・HOT 条件よりも大きい傾向が見られた。これは、下肢の冷却中に皮膚の血流が減少し、体温低下を抑えるために震えや非震えによって生成される熱が増える (Yanagisawa et al., 2007) ことによる体温調節反応である可能性がある。反対に、COLD・COOL 条件と比較して、HOT・WARM 条件の総発汗量が多いので、これらの加温条件では発汗による熱放散が増加したために核心温度の上昇が抑えられた可能性がある。HOT 条件の Tty は、RSC 終了 10 分後までベースラインと比較し有意に上昇したが、COLD・COOL 条件では減少した。また、WARM 条件での Tty には大きな変化が見られなかった。皮膚温は皮膚表面の還流血液温度を反映する。HOT・COLD・COOL 条件では皮膚表面が冷却および加温されるので、RSC によって血液循環が増加した時に皮膚表面の血液が中枢 (心臓) に帰還して Tty の変化を引き起こしたのかも知れない。

6 秒間の単一スプリントでは、総エネルギーの約 40% を解糖系からのエネルギー供給に依存するが、スプリントを繰り返すごとに解糖からの供給割合が徐々に減少する

(Gaitanos et al., 1993) . 反対に, 単一スプリントの総エネルギー消費量に対する有酸素性エネルギーの寄与は 10%未満である (McGawley and Bishop, 2008; Parolin et al., 1999) が, スプリントが繰り返されると, 有酸素性 ATP 供給量の比率が増加し, RSC 運動の最終反復時にはその比率は 40%に達する (McGawley and Bishop, 2008) . 本研究では, 4つの温度条件で PPO および MPO のピーク値は最初のスプリントで観察され, これらの値はスプリント回数の増加とともに徐々に減少した. この現象は, RSC 運動の特徴と一致しており (Bishop et al., 2004; Girard et al., 2011) , 一部嫌気性解糖の障害が原因の可能性がある. Beaven et al. (2018) は, 体温上昇が RSC のパフォーマンスを向上させたのにもかかわらず, 後半に観察されたパフォーマンスの低下は, ATP 代謝回転率の上昇が ATP を減少させ, 疲労を早めた可能性を示唆している. しかし彼らは, 保温服を着てウォームアップを行っているため, 受動的に加温した本研究より, 多くのエネルギー基質を使った可能性がある.

筋温の上昇は, 筋肉や関節の粘性抵抗の低下 (Bishop, 2003), 神経インパルスの伝達速度の上昇 (Karvonen, 1992) につながり, グリコーゲン分解, 解糖, 高エネルギーリン酸分解を促進することが報告されている (Febbraio et al., 1996) . そのため筋温の上昇は, 単一スプリントのパフォーマンス向上につながるが, 疲労を加速させる (Thornley et al., 2003) 可能性がある. 本研究では, RSC 前半の高温条件 (HOT, WARM) における作業能 (PPO, MPO および SWO) は, 低温条件 (COLD・COOL) よりも高い

値を示したが、後半の 4 条件間では顕著な差は見られなかった。RSC の前半は、後半よりも筋肉の温度の影響を受けやすい可能性がある。また、RSC の後半は疲労の影響が温度の影響より強く出る可能性も考えられる。

本研究における HOT 条件の ΔT_{ty} は、RSC 中の COLD や COOL 条件よりも有意に高かった。Drust et al. (2005) は、高体温（核心温度, 39.5°C; 筋肉温度, 40.2°C）では RSC のパワーが低下することを報告している。筋温の上昇がスプリントパフォーマンスを改善するという報告があるにもかかわらず、彼らは、核心温の上昇が RSC のパフォーマンスに悪影響を及ぼしたと結論付けている。他の研究でも被験者の核心温がテスト前に実験的にほぼ 39°C に上昇した場合、高温環境下での短時間作業中のパフォーマンスは低下することが報告されている (Morrison et al., 2004; Racinais et al., 2008)。しかし高体温でない場合は、RSC のピークパワーは高温条件で向上する (Girard et al., 2013)、あるいは変化しない (Almudehki et al., 2012; Matsuura et al., 2015)。本研究における環境温度は中性温度域内 ($24.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$) であり、RSC は比較的短い時間（休憩時間を含めて 336 秒）で終了した。HOT 条件における T_{ty} の有意な増加は、RSC 終了の 10 分後でのみ観察されたが、本研究では高体温 (39°C 近く) が観察されなかったため、RSC パフォーマンス (PPO・MPO) の減少に与える核心温 (ΔT_{ty}) 上昇の影響は小さかったかも知れない。

WARM 条件における PPO, MPO, SWO は、COLD・COOL 条件に比べて有意に

高かったが($p < 0.01$), WARM と HOT 条件の間に有意な差はなかった. さらに, WARM 条件の ΔT_{ty} は一定で変動は少なかったが, HOT 条件の ΔT_{ty} は RSC の 10 分後に有意な上昇を示した ($p < 0.01$). WARM 条件の総発汗量は HOT 条件よりも有意に低く, さらに HR および RPE は HOT 条件よりも低い傾向にあった. これらの結果から, RSC のパフォーマンスは WARM と HOT 条件では同程度であったが, 熱ストレスや HR, RPE にみられる生理的負担は WARM 条件が HOT 条件より低かったと考えられる.

結論として, RSC パフォーマンスにおよぼす活動筋温の影響は, RSC の前半と後半で異なることが明らかになった. また HOT 条件において T_{ty} と総発汗量の有意な上昇が観察されたことは, RSC 後半のパフォーマンスの低下に熱ストレスが関与し, さらに高いパワー発揮による疲労の関与も否定できない.

第 5 節 図表



Figure 2-1. The water perfusion trousers used in this experiment. A and B show and outside and inside view of the trousers, respectively.

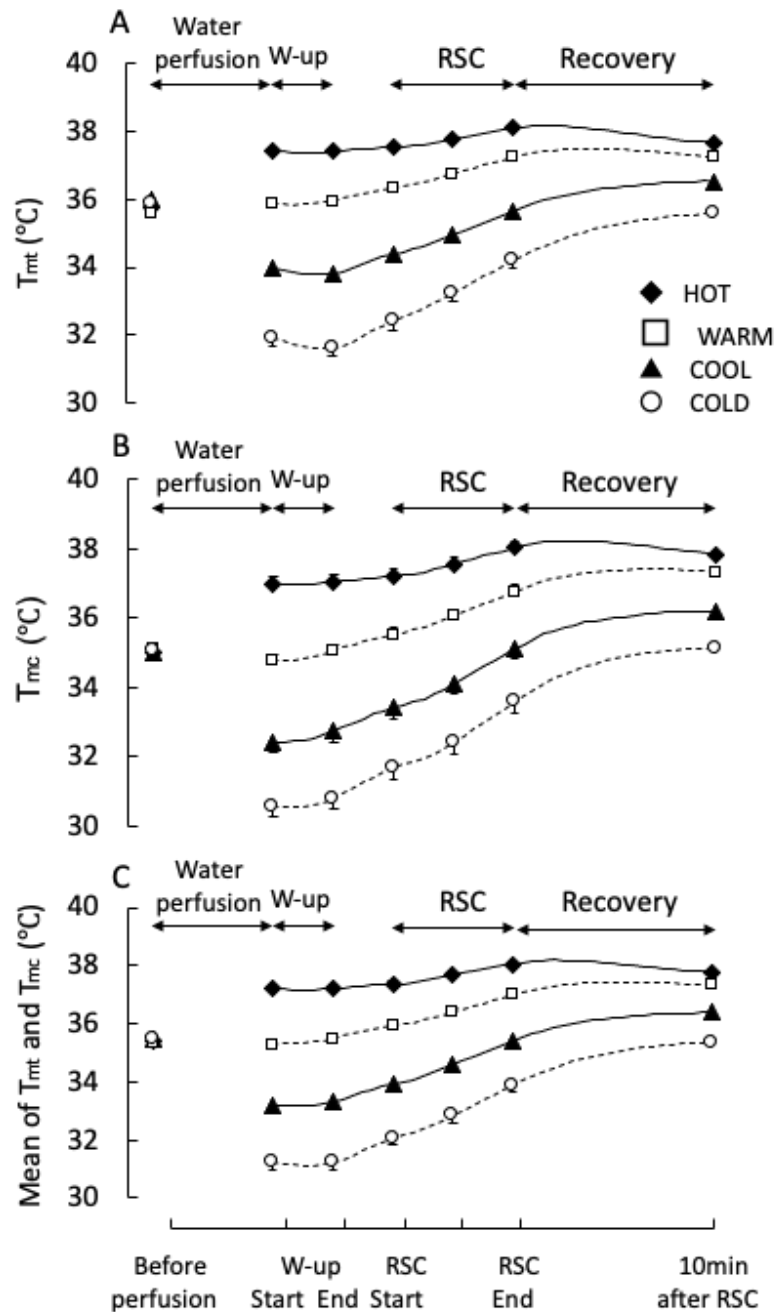


Figure 2-2. Changes in the muscle temperature in the thigh (T_{mt} , A), calf (T_{mc} , B), and the mean T_{mt} and T_{mc} (C) from “Before water perfusion” to “10 min after repeated sprint cycling (RSC)” under 4 conditions (HOT, WARM, COOL, and COLD). Significant differences ($p < 0.01$) among the four conditions were observed from “warm-up (W-up) Start” to “RSC End”. The data are expressed as the mean \pm SE.

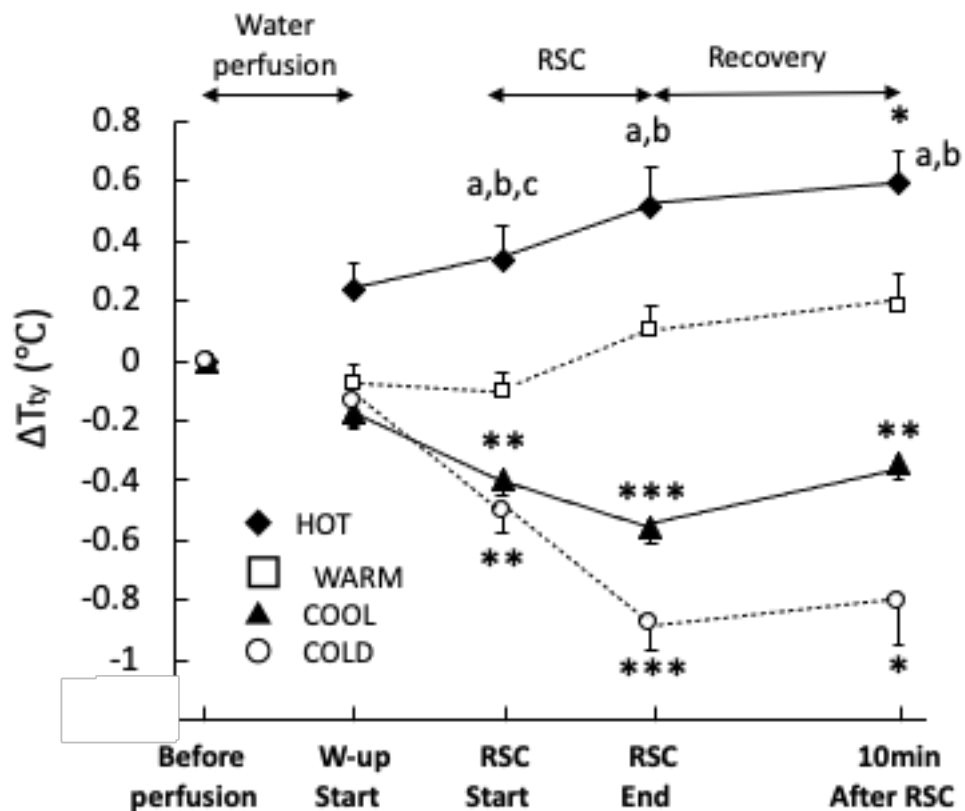


Figure 2 - 3. Changes in the increase in the tympanic temperature (ΔT_{ty}) from “Before water perfusion” to “10 min after repeated sprint cycling (RSC)” under 4 conditions (HOT, WARM, COOL, and COLD). The data are expressed as the mean \pm SE. *($p < 0.05$), **($p < 0.01$), and ***($p < 0.001$) show significant difference from “Before water perfusion” level. ^a, ^b and ^c show significant difference ($p < 0.05$) from COLD, COOL and WARM, respectively. W-up, warm-up.

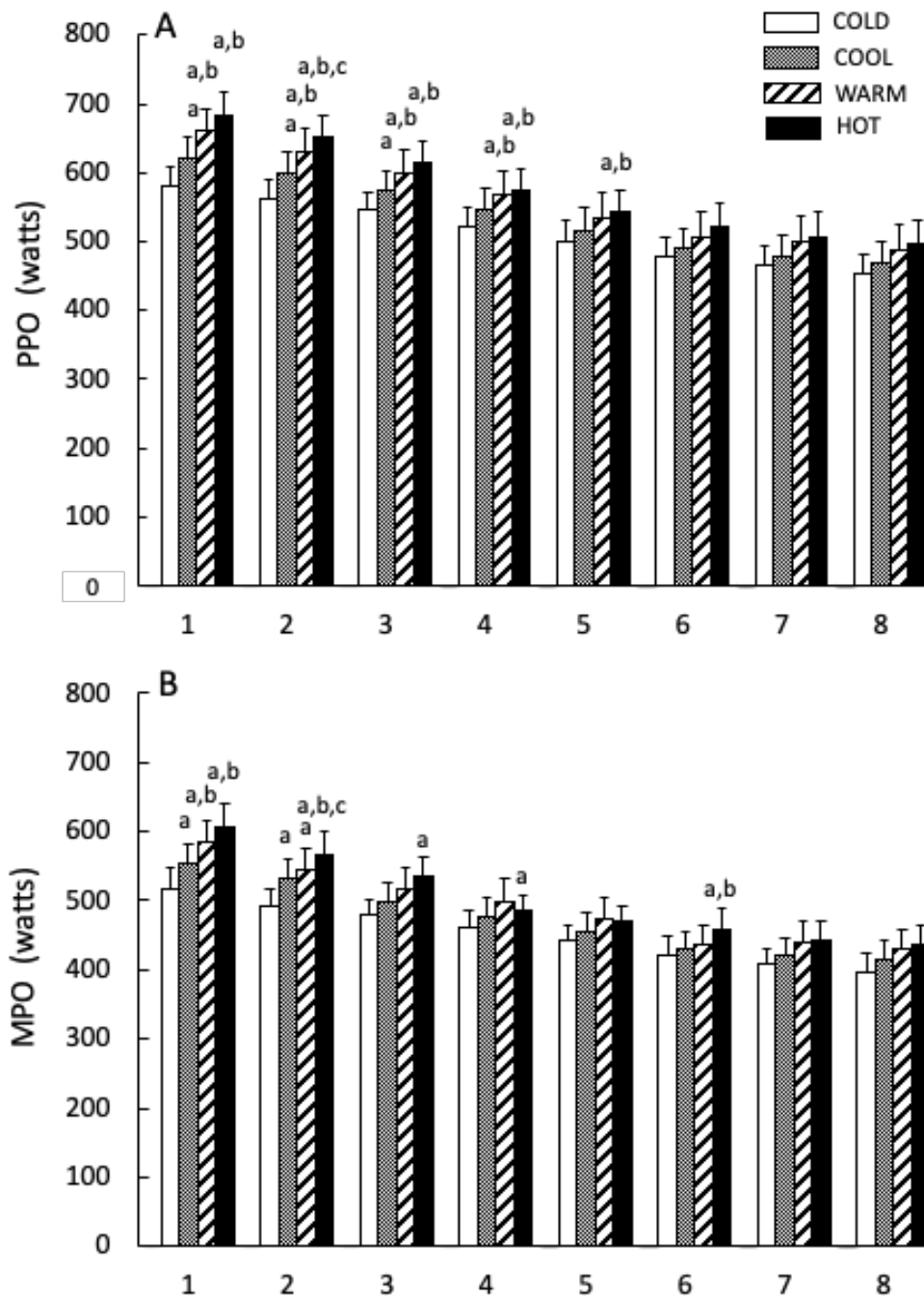


Figure 2-4. The peak power output (PPO, A) and mean power output (MPO, B) during repeated sprint cycling under four conditions (HOT, WARM, COOL and COLD). The data are expressed as the mean±SE. ^a, ^b and ^c show significant difference ($p < 0.05$) from COLD, COOL and WARM, respectively.

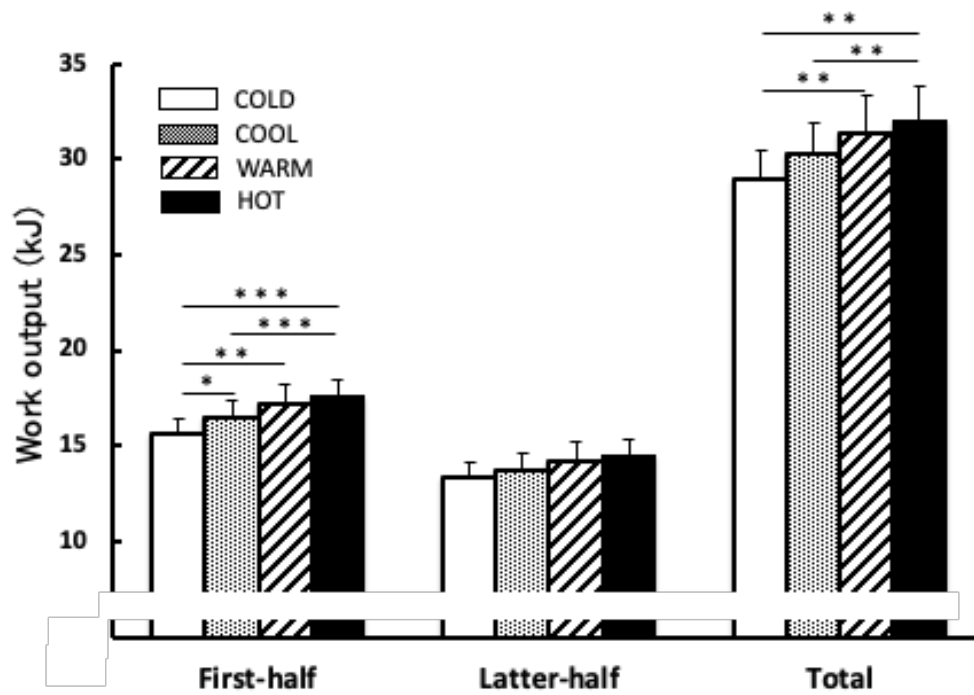


Figure 2-5. A comparison of the work output under four conditions (HOT, WARM, COOL and COLD). The data are expressed as the mean \pm SE.

*($p < 0.05$), **($p < 0.01$) and ***($p < 0.001$) show significant differences between conditions.

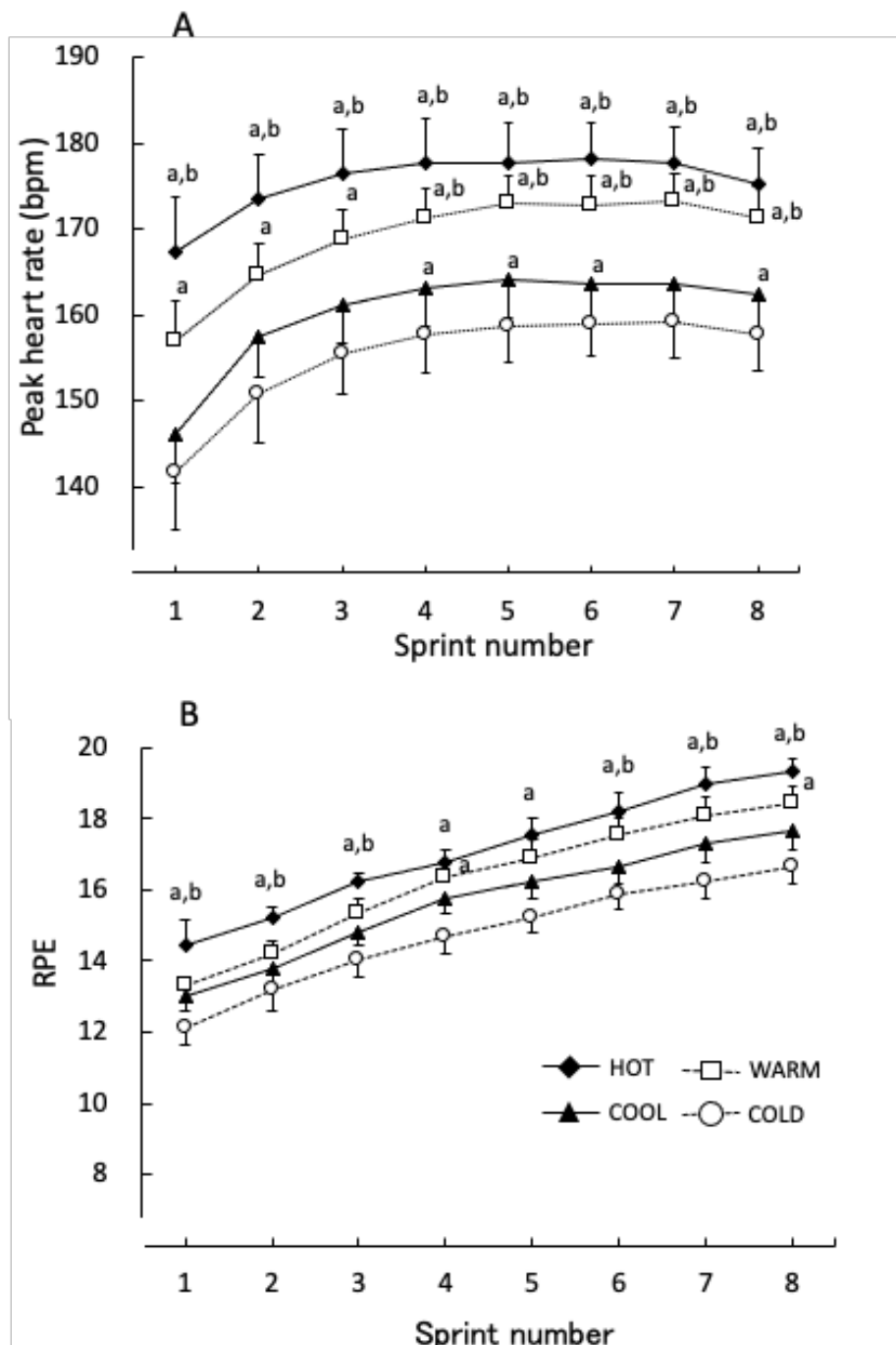


Figure 2-6. Changes in the peak heart rate (A) and RPE (B) during repeated sprint cycling under four conditions (HOT, WARM, COOL and COLD). The data are expressed as the mean \pm SE. ^a and ^b show significant difference ($p < 0.05$) from COLD and COOL, respectively.

第3章

下半身の加温または冷却が多段階運動テストのパフォーマンスと

生理的負担におよぼす影響

第1節 目的

第2節 方法

第3節 結果

第4節 考察

第5節 図表

第1節 目的

本研究の目的は、活動筋を低温から高温まで変化させ、自転車エルゴメーターを用いて多段階漸増負荷テスト (Graded exercise test, GXT) を実施した場合の、運動パフォーマンスに与える身体の温熱状態の影響を明らかにすることであった。

第2節 方法

1. 被験者

被験者は健康な男子大学生 8 名 (年齢, 24 ± 1 歳; 身長, 175 ± 2 cm; 体重, 64.8 ± 2.0 kg; 体脂肪率, $13.0 \pm 0.8\%$; 大腿部と下腿部の平均皮下脂肪厚, 5.0 ± 0.5 mm; $\dot{V}O_{2peak}$, 51.1 ± 2.4 ml/min/kg) であった。実験を行うにあたり、被験者に実験の目的および危険性についての十分な説明を行い、同意を得た。本研究は、京都工芸繊維大学倫理委員会の承認 (受付番号 2009-14) を得て行った。

2. 事前測定

被験者は電気ブレーキ式自転車エルゴメーター (POWERMAX-VII, COMBI) を使用し、中性温環境 (環境温度, $24.1 \pm 0.2^{\circ}$ C; 相対湿度, $55 \pm 3\%$) に維持した実験室で GXT を実施した。運動強度は 0.3 kp から開始し、1分毎に 0.3 kp (約 18 W/min) ずつ増加させた。ペダル回転数は毎分 60 回転 (rpm) に設定し、被験者が疲労困憊になったと

き、または60 rpmのペダル回転数を維持できなくなったときにテストを停止し、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) のピーク値 ($\dot{V}O_{2peak}$) を決定した。 $\dot{V}O_{2peak}$ の基準は、1) 運動負荷が増加したにも関わらず $\dot{V}O_2$ が増加しなかった時、2) 運動時の呼吸交換比 (Respiratory exchange ratio, RER) が1.15以上になった時の2つとした。

呼気ガス分析は、ブレスバイブレス法による呼気ガス分析計 (Mets-900, Vise Medical) を用いて測定し、分時換気量 ($\dot{V}E$)、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) および RER を毎分記録した。HR は心拍数モニター (BSM-7201, 日本光電) を用い1分毎に記録した。 $\dot{V}O_{2peak}$ を決定するこのテストは、本実験を行う少なくとも1週間前に完了した。

3. 実験手順

被験者には実験室来室時刻の24時間前から激しい運動を、17時間前から塩分の多い食べ物やアルコール、カフェインの摂取を、さらに3時間前から食事の摂取を禁止し、本実験当日は12時(午後0時)に被験者を実験室に来室させた。被験者には脱水を避けるために200-300mlの水分摂取を許可し、10g精度の体重計 (FW-100K, A & D) を用いて裸体体重を測定した。被験者は長袖Tシャツ、競泳用パンツを着用し、全ての測定機器を取り付けた後に水循環ズボンを着用した。30分間の座位安静の後、水循環ズボンに水 (6°C, 17°C, 32°C, 44°C) を循環させ、下肢を冷却または加温した。水循環ズボ

ンに循環させる水は、恒温水槽（LTB-400, 井内）を使用して水温を制御し、電動ポンプ（UPS 25-8-JA, Grundfos）を使用して 0.6 L/分で水を水循環ズボン内に循環させた。被験者は T_{mm} が目標温度（およそ 31°C, 33°C, 35°C, 37°C）に達するまで座位安静をとり、目標温度に達した後、自転車エルゴメーターに移動し運動テストを実施した。水循環ズボンへの水の還流は運動終了時まで続けた。運動テストのプロトコルおよび室温は、 $\dot{V}O_{2peak}$ を測定した事前測定と同じ環境で行った。運動テストは最低 5 日間の間隔をあけた。または、各温度条件（COLD, COOL, WARM, HOT）はランダムの順序で実施した。

4. 測定項目

活動筋温は、ZHF法（Fox et al., 1973）による深部体温計（コアテンプ CM-210, テルモ）を用いて、 T_{mt} および T_{mc} の深部温を測定し、その平均値である T_{mm} で評価した（Inoue et al., 2021）。被験者の膝蓋骨から10cm上部の右外側広筋（ T_{mt} ）と腓腹筋筋腹中央部（ T_{mc} ）に直径4.3cmの深部体温計のセンサー（CM-210 PD1;テルモ）をテープで固定した。センサーは4つの実験条件すべてで同じ位置に取り付けた。なお水循環ズボンのチューブとの接触を防ぐために、センサーの上部を断熱材で覆った。 T_{mt} および T_{mc} の測定は、実験を通して30秒毎に記録した。 T_{ty} は、赤外線鼓膜温度計（3000A; Genius, Argyle）を使用してFigure 3-1に示すように水循環前（Before perfusion）、運動開始前（Start, 0）、運動開始4分後、8分後、および運動終了時（End）に測定した。

Ttyの測定は3回行い、データは3回の平均値として示した。皮膚温は熱伝対を用いて3部位（胸，上腕，大腿）を30秒毎に測定し，Roberts et al. (1977) の式： $0.43 \times \text{胸} + 0.32 \times \text{大腿} + 0.25 \times \text{上腕}$ から平均皮膚温 (Mean skin temperature, Tsk) を算出した。平均体温 (Mean body temperature, Tb) は，以下の3コンパートメントモデルの式によって計算した： $0.67 \times \text{Tes} + 0.23 \times \text{Tmt} + 0.1 \times \text{Tsk}$ (Stolwijk and Hardy, 1966) 。本研究では，核心温としての食道温 (この式のTes) の代わりにTtyを使用した。この3コンパートメントモデルによって計算されたTbは皮膚の血管拡張と相関することが確認されている (Demachi et al., 2012) 。貯熱量 (kJ) は以下の式から求めた： $\text{体重} \times \text{Tb}$ の増加 (ΔTb) $\times 3.474$ (Nielsen, 1990) 。熱伝対の較正は，実験開始前に35~37°Cの水に各プローブを浸して実施した。総発汗量は，実験前後の体重の差分から，呼吸水分損失量を補正した値とした (Mitchell et al., 1972) 。 $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ およびRERは毎分記録した， $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ およびHRの測定は「事前測定」で説明した通りである。疲労困憊に達するまでの運動継続時間 (Time to exhaustion, TTE) は，運動テストが停止された時間として定義したが， $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ が観察された時間ではない。

5. 統計処理

結果は全て平均値±標準誤差で示した。統計解析は統計処理ソフト SPSS.ver.24 for Windows を用いて行った。対応のある二元配置分散分析 (ANOVA, 条件×時間) を使用

し、4つの温度条件（COLD, COOL, WARM, または HOT）で測定された値を比較した。主効果または交互作用があった場合は Bonferroni の *post-hoc test* を実施した。4つの温度条件における $\dot{V}O_{2peak}$ と TTE の比較には一元配置分散分析を使用した。有意水準は5%未満とした。G*power (Ver.3.19) を用いて $\dot{V}O_{2peak}$ および TTE の検出力を検定した結果、これらの検出力 ($1-\beta$) は 0.80 を超えていた。

第3節 結果

1. 体温および貯熱量

Table 3-1 に4つの温度条件の筋温 (T_{mt} , T_{mc} , および T_{mm}) を示した。COLD, COOL, WARM, HOT 条件における目標筋温の到達時間はそれぞれ 143 ± 9.4 分, 111 ± 6.4 分, 58 ± 9.0 分, 153 ± 12.1 分であった。安静時 (Table 3-1 の”Before perfusion”) の T_{mt} , T_{mc} および T_{mm} の値は、4条件間で類似していたが、これらの値は運動の開始時 (”Start”) から運動終了まで (”End”) 大きく異なり、温度条件間で有意差 ($p < 0.05$) があった。

Figure 3-1 に4条件の T_{ty} (ΔT_{ty}), T_{sk} , および T_b の変化を示す。”Before perfusion” の T_{ty} 値は $36.1 \sim 36.2^\circ\text{C}$ で、4条件間で類似していた。HOT および WARM 条件の ΔT_{ty} は、”Start”よりも”End”で有意に高く ($p < 0.05$)、さらに COLD および COOL 条件よりも有意に高かった ($p < 0.05$)。加えて、HOT 条件での ΔT_{ty} は WARM 条件よりも有意に高かった ($p < 0.05$)。ただし、COLD および COOL 条件の ΔT_{ty} は、”Start”よりも”End”

が低くなる傾向があった ($p=0.07$)。Tsk は水温の影響を受けたため、運動テストを通して4条件間の Tsk は有意な差があった (それぞれ $p < 0.05$)。WARM, COOL, および COLD 条件の Tsk は ”Start”よりも”End”が有意に高かった (それぞれ, $p < 0.05$)。ただし, HOT 条件の Tsk は, 運動中に有意な変動はなかった。HOT および WARM 条件の Tb は, ”Start”よりも”End”が有意に高く ($p < 0.05$) , これらの値は, COLD と COOL 条件よりも有意に高かった ($p < 0.05$)。

Figure 3-2 に 4 条件の貯熱量を “Before perfusion”から”Start” (Phase A) , ”Start”から”End” (Phase B) , “Before perfusion”から”End” (Phase C) の3つのフェーズに分けて示した。貯熱量は3つのフェーズ全てにおいて COLD と COOL 条件よりも HOT と WARM 条件が有意に高く ($p < 0.05$) , さらに WARM 条件よりも HOT 条件が有意に高かった ($p < 0.05$)。

2. GXT における生理的反応

Figure 3-3 に 4 条件の $\dot{V}O_2$, (A) , HR (B) , 総発汗量 (Total sweat loss, C) を示した。4 条件の $\dot{V}O_2$ と HR は運動負荷の上昇に伴って増加したが, $\dot{V}O_2$ は 4 条件間で有意差はなかった。HR は, HOT 条件が COOL 条件や COLD 条件よりも有意に高く ($p < 0.05$) , WARM 条件も COLD 条件に比べて6分目で有意に高かった ($p < 0.05$)。総発汗量は, HOT と WARM 条件が COLD と COOL 条件よりも有意に多く ($p < 0.05$) , さらに HOT

条件において最高値が観察され、WARM 条件よりも有意に多かった ($p < 0.05$) .

3. GXT パフォーマンス

Table 3-2 に 4 条件における $\dot{V}O_2\text{peak}$, TTE, 最大心拍数 (HRmax) を示した. $\dot{V}O_2\text{peak}$ と TTE は 4 条件間で有意差はなかった. HOT と WARM 条件の HRmax は, COOL と COLD 条件より有意に高かった (それぞれ $p < 0.05$) . しかし, HOT と WARM 条件間または COOL と COLD 条件間の HRmax に有意差はなかった.

第4節 考察

本研究の目的は, GXT パフォーマンスにおよぼす筋温の影響を明らかにすることであった. 本研究は下半身を冷却または加温して, 運動開始時の筋温を $31.3\sim 37.0^\circ\text{C}$ の範囲に変化させたが, 中性温環境で実施した 20 分未満の GXT 中の $\dot{V}O_2$, $\dot{V}O_2\text{peak}$, そして TTE にはほとんど影響を与えないことを示した. 一方 HR や貯熱量, 総発汗量に表される温熱ストレスは低筋温条件 (COOL および COLD) よりも高筋温条件 (WARM および HOT) で有意に高かったが, GXT パフォーマンスにおよぼす影響は少ないことが示唆された.

Danek et al. (2019) は, ウォームアップが中性温環境での GXT パフォーマンスを改善することを報告している. 彼らは $60\%\dot{V}O_2\text{max}$ 強度で 15 分間のウォームアップを行

ったが、ウォームアップにより核心温を増加させる可能性があるにもかかわらず、核心温は報告していない。彼らの研究結果は、60%から約70% $\dot{V}O_2$ maxの強度で15分間のウォームアップを実施した際に直腸温が安静値から約0.5°C上昇したJohnson et al.(2014)の結果と一致している。また、約15分間の持久性運動中にウォームアップを行わなかった場合と比較して、ウォームアップの実施は有酸素運動のパフォーマンスを改善することが報告されている (Johnson et al., 2014)。本研究と先行研究の違いは、ウォームアップの有無によるものかもしれない。Koga et al. (1997) は、運動前に温水を循環させたズボンを着用して筋温を上昇させた後に中強度から高強度の運動を実施しても運動中の $\dot{V}O_2$ が増加しないことを報告した。これらの結果は、受動的加温による活動筋や核心温の上昇は中性温環境でのGXTのパフォーマンスに影響されないことを示唆している。

温熱ストレスは、WARMおよびHOT条件がCOOLまたはCOLD条件よりも高かったが、4つの温度条件間で $\dot{V}O_2$ peakまたはTTEに有意差はなかった。過度の温熱負荷は、持久性の運動パフォーマンスを減退させる要因であるが (Nybo and Nielsen, 2001; González-Alonso, 1999)，その一方で、暑熱環境で実施した約30分のGXT中のパフォーマンスには悪影響をおよぼさなかったとの報告もある (Aleksander et al, 2010; Smolander et al., 1986)。本研究では、GXT終了時の核心温度 (T_{ty}) は約38.1°Cであったが、運動中はおおむね38°Cを下回っていたため、運動の継続が困難になる体

温 (critical core temperature) 以下であった (Nybo and Nielsen, 2001; González-Alonso, 1999) . さらに, GXT とは低い運動強度から開始し, 一定の間隔で段階的に負荷を増加させ, 疲労困憊に至り運動の継続が困難になるまで, または所定の基準が満たされるまで実施するが, 多くは 20 分以内に終了する運動である (Aleksander et al, 2010) . 一方で, 持久性パフォーマンスの低下について報告した先行研究では, $60\% \dot{V}O_2\text{max}$ と運動負荷を固定して運動を 30 分以上継続している (Nybo and Nielsen, 2001; González-Alonso, 1999) . これらの研究では, 運動の継続が困難になる核心温 (直腸温で約 40°C) に達するまで行っている. したがって, 本研究で用いた GXT と先行研究で用いられている固定負荷運動では運動継続時間が異なる. およそ 20 分未満で運動が終了する GXT では, 高い環境温度や軽度の体温の上昇 (約 1°C) により運動パフォーマンスは低下しないことが示唆される.

冷却条件下の T_{ty} および T_{sk} の低下は, 加温条件と比較して $\dot{V}O_2$, $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ または TTE を低下させなかった. Fujimoto et al. (2016) は, GXT を水中で実施した場合, 26°C と 34°C の水温では大きな違いはないと報告している. この研究で T_{es} は約 37°C , T_{sk} は 26°C の水浸後約 27°C であった. Imai et al. (2018) は中性温環境 (25°C) で, 水循環スーツを使用して 10°C の水を還流させて体を冷却した場合, GXT 開始時の T_{es} と T_{sk} はそれぞれ約 36°C および 30°C であり, GXT のパフォーマンスは冷却しない条件と類似していたことを報告している. 本研究では, 先行研究とは異なり核心温として T_{es}

を測定していないが、GXT 開始時の Tty と Tsk はそれぞれ約 35.8°C と 31.5°C であり、先行研究 (Fujimoto et al., 2016; Imai et al., 2018) と類似している。

冷却条件における GXT パフォーマンスの維持は、筋温が原因の可能性もある。Imai et al. (2018) は、冷涼な環境で身体を冷却すると $\dot{V}O_2\text{peak}$ が低下することを報告している。彼らの研究では筋温は測定されていないが、Tsk は約 25°C、大腿部皮膚温は約 24°C、下腿部皮膚温は約 24°C であり、これらの値は筋温の低下 (約 29.5°C) と筋パフォーマンスの低下が報告されている先行研究 (Tsk, 約 26°C; 下腿部皮膚温, 約 24°C) (Oksa et al., 1997) と類似している。本研究では Tsk と大腿部皮膚温はそれぞれ 31°C と約 24°C であり、活動筋である Tmt が約 32°C, Tmc が約 30°C であった COLD 条件では、先行研究 (Imai et al., 2018; Oksa et al., 1997) よりも高かった。そのため、中性温環境 (約 25°C) での運動では、軽度の活動筋温や皮膚温の低下は GXT のパフォーマンスに影響しないことが示唆される。

本研究における筋温は、深部体温計 (Coretemp CM-210) を使用して ZHF 法で推定した (Fox et al., 1973; Takizawa et al., 2018; Matsukawa et al., 1996)。筋温は測定部位の深さに依存する (Saltin et al., 1968) が、ZHF 法は皮膚表面から深さ 18mm 部位の温度を反映すると報告されており (Matsukawa et al., 1996)、この方法はいくつかの研究で使用されている (Inoue et al., 2021; Demachi et al., 2012; Takizawa et al., 2018)。本研究の被験者の大腿部と下腿部の平均皮下脂肪厚は $5.0\pm 0.5\text{mm}$ であるため、筋温を絶

縁するほどの皮下脂肪厚ではない。したがって ZHF 法によって測定される筋温は、大腿および下腿の筋温変化を反映していると考ええる。

このような方法で推定した筋温は GXT を通して 4 つの温度条件間で大きく異なった。T_{mm} は、GXT 終了時に、COLD、COOL および WARM の条件で、初期値(つまり, "Start") から大幅に上昇した (それぞれ $p < 0.05$)。冷却条件の T_{mm} の上昇度合いが高いのは、おそらく下肢の冷却によって運動中の体温の低下を抑える体温調節反応によるものと思われる (Yanagisawa et al., 2007)。本研究では 4 条件間で $\dot{V}O_2$ に有意差がなかったため、ふるえ熱産生や非ふるえ熱発生は亢進しなかった可能性がある。血管収縮によって熱損失を防ぐことは、冷却条件における T_{mm} のさらなる上昇を引き起こした可能性がある。したがって、推論ではあるが、冷却条件では好気性 (Johnson et al., 2014; Pearson et al., 2011; Jones et al., 2003; Koga et al., 1997) および嫌気性 (Febbraio et al., 1996) のエネルギー供給が損なわれなかったため、GXT のパフォーマンスが維持されたのかもしれない。

冷却条件 (COOL と COLD) の HR は、加温条件 (WARM と HOT) よりも GXT 中に有意に低い値を示したが、 $\dot{V}O_2$ は 4 つの条件間で有意差はなかった。これらの結果は、身体冷却が一定負荷運動時の酸素摂取量 (定常状態) を変化させなかった先行研究 (Johnson et al., 2014; Pearson et al., 2011; Jones et al., 2003; Koga et al., 1997) の結果と類似していた。身体冷却により HR が低下する現象 (Booth et al., 2001; Wegmann et

al., 2012) は、末梢血管収縮の増強が皮膚温を低下させていることを示唆する (Lee and Haymes, 1995) . 末梢血管収縮は静脈還流の増加を誘発し、それが運動中の筋血流の増加につながる可能性がある (Duffield and Marino, 2007; Bogerd et al., 2010) . しかし Imai et al. (2018) の結果では、対照条件と冷却条件との間では HR に有意差はなかった. この実験では、GXT の開始前に冷却を終了しているが、冷却条件の Tsk は GXT の終了時に約 31.6°C であった. 本研究では実験終了まで冷却を続けたが、Tsk は COOL 条件が約 33°C、COLD 条件が約 32.5°C で、どちらも Imai et al. (2018) が報告した温度よりも高く、核心温は本研究と Imai et al. (2018) および他の冷却研究 (Booth et al., 2001) と同様であった. したがって、本研究における冷却条件は加温条件よりも HR が低かった現象を皮膚温および核心温の低下による静脈還流の増加から説明するには不十分である.

加温条件では、冷却条件よりも貯熱量および総発汗量は有意に大きく、より温熱ストレスが高かった. 下半身の加温による Tsk の増加は、温められた血液が末梢組織 (下半身の皮膚) から中枢組織 (心臓) に戻るため、運動中に高い ΔT_{ty} を誘発したと考えられる. これは、加温条件における総発汗量の増加を引き起こした可能性がある. しかし HOT 条件の総発汗量は、有酸素運動のパフォーマンスを損なう可能性がある 2% の体重減少 (Cheuvront et al., 2003) をはるかに下回る. したがって、加温による温熱ストレスの増加は、運動のパフォーマンスにほとんど影響を与えない可能性がある. 対照

的に、COOL および COLD 条件の ΔT_{ty} は、ベースラインと比較して減少した (Figure 3-1A) . 身体を冷却した後の運動の初期段階で核心温の低下がしばしば観察される (Mitchell et al.,2003; Schmidt and Brück, 1981) . これは冷却された末梢から中枢へ冷たい血液が帰還 (静脈還流) したことを示唆している (Rollnik et al, 2001) . ただし、このような筋肉や核心の温度低下は GXT のパフォーマンスにほとんど影響を与えていないため、温熱ストレスをわずかに上昇または低下させても、中性温環境では GXT のパフォーマンスに影響しないことが示唆される.

本研究の限界について、まず、GXT のパフォーマンスを評価するために、1 分毎に負荷を増加させる漸増プロトコルを使用した。先行研究では、ピークパワーと $\dot{V}O_{2max}$ は、漸増負荷テスト中のステージ期間の変更 (3~5 分毎の負荷漸増) の影響を受けることが指摘されている (Bentley et al., 2007; Pierce et al., 1999) . したがって、筋温の上昇または低下が、さまざまな漸増負荷プロトコルで実施した GXT のパフォーマンスに影響を与えるかどうかを明らかにするためにさらなる研究が必要である。次に、本研究では自転車エルゴメーターを使用して GXT のパフォーマンスを評価した。上記のように、体温が上昇すると筋腱複合体の粘弾性が低下する (Bishop, 2003) . そのため GXT をランニングで行うと有酸素運動のパフォーマンスが向上する可能性がある。トレッドミルによるランニングと多段階シャトルランニングなど、さまざまな運動タイプを使用した場合の筋温の影響を明らかにするための研究が必要である。

本研究の結論として、運動開始時の広範囲の筋温（31.3～37.0°C）でさえ、中性温環境での GXT 中の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}O_{2peak}$ および TTE にほとんど影響しないことが示唆された。さらに GXT パフォーマンスは運動前の身体の加温または冷却による心血管または温熱ストレスの影響を受けないことが示された。

第5節 図表

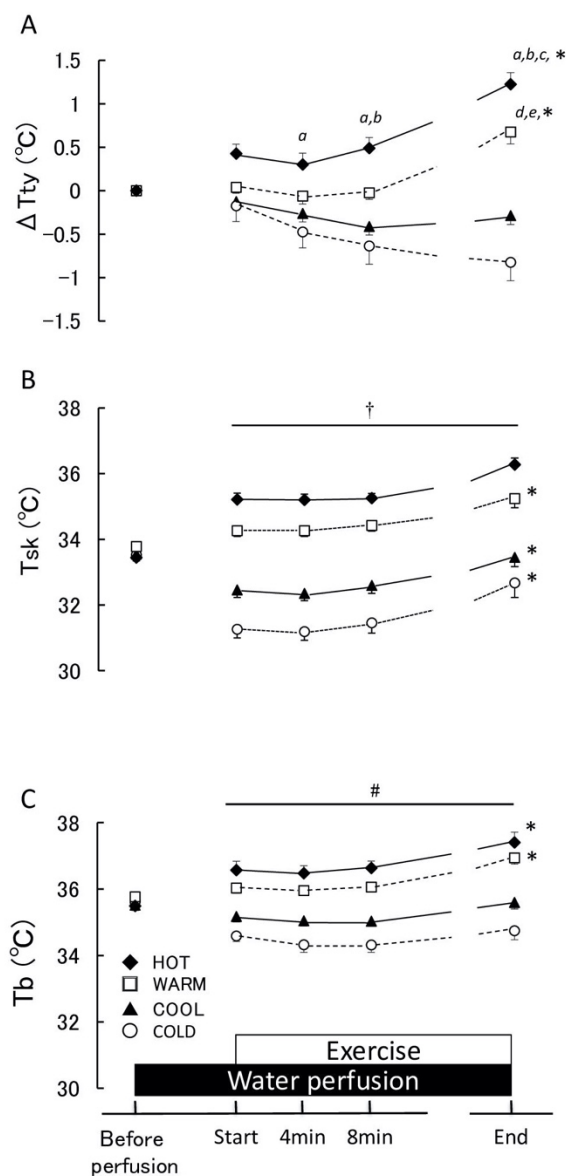


Figure 3-1. Changes in the tympanic temperature (ΔT_{ty} , A), mean skin temperature (T_{sk} , B) and mean body temperature (T_b , C) under the HOT, WARM, COOL and COLD conditions. The data are expressed as the mean \pm SE. * and † show significant differences ($p < 0.05$) from the “Start” level and among the four conditions, respectively. # shows significant differences ($p < 0.05$) among the conditions, where significance was not observed between COLD and COOL conditions. *a*, *b*, *c*, *d* and *e* indicate significant difference ($p < 0.05$) between HOT vs. COLD, HOT vs. COOL, HOT vs. WARM, WARM vs. COLD and WARM vs. COOL, respectively.

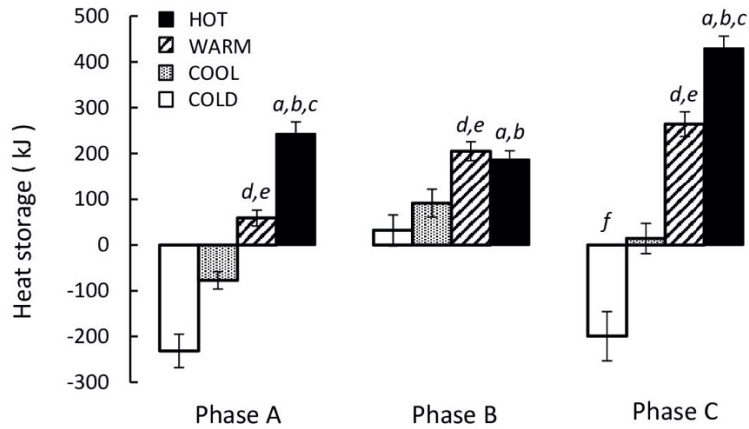


Figure 3-2. The heat storage at three phases, from the start of water perfusion to before the exercise test (“Before perfusion to Start”[Phase A]), from the start to the end of exercise (“Start to End”[Phase B]), and from the start of water perfusion to the end of exercise (“Before perfusion to End”[Phase C]) under the four conditions. The data are expressed as the mean \pm SE. Significant differences ($p < 0.05$) were described as follows: *a*, HOT vs. COLD; *b*, HOT vs. COOL; *c*, HOT vs. WARM; *d*, WARM vs. COLD; *e*, WARM vs. COOL; *f*, COLD vs. COOL.

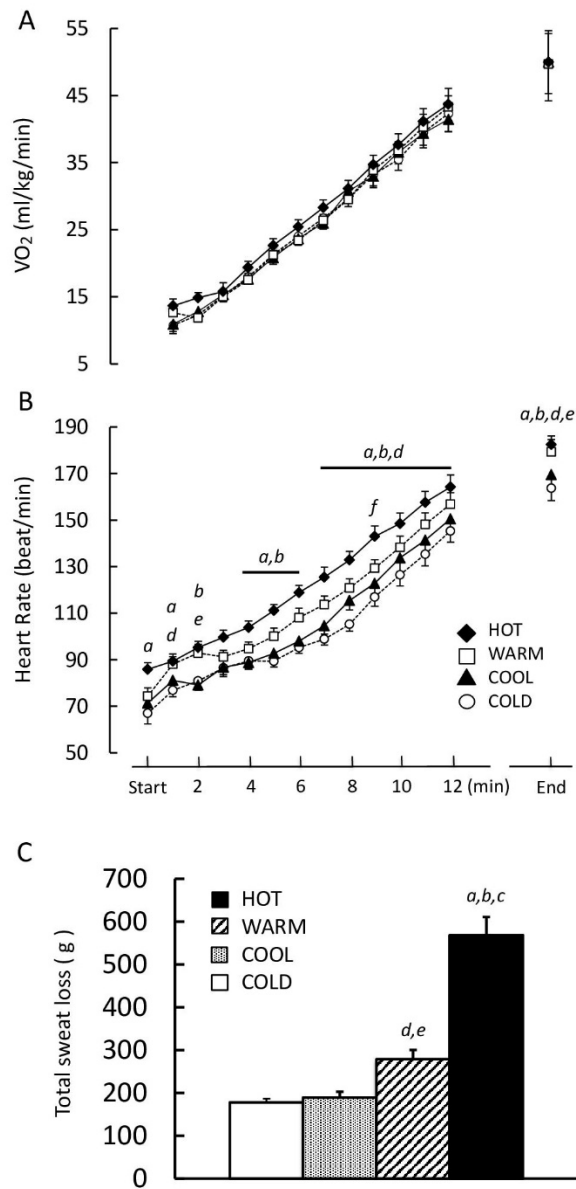


Figure 3-3. The comparison of the oxygen uptake ($\dot{V}O_2$, A), heart rate (HR, B), and total sweat loss (C) under the four conditions. The data are expressed as the mean \pm SE. Significant differences ($p < 0.05$) were described as follows: *a*, HOT vs. COLD; *b*, HOT vs. COOL; *c*, HOT vs. WARM; *d*, WARM vs. COLD; *e*, WARM vs. COOL; *f*, COLD vs. COOL

Table 3-1. The deep thigh temperature (Tmt), calf temperature (Tmc), and mean thigh and calf temperature (Tmm) under HOT, WARM, COOL and COLD conditions.

| | | COLD | COOL | WARM | HOT | |
|-------|-------|------------|------------|---------------------|-----------------------|--------------|
| Tmt | Rest | 35.1 ± 0.2 | 34.7 ± 0.2 | 35.3 ± 0.2 | 34.7 ± 0.2 | |
| | Start | 32.1 ± 0.3 | 34.0 ± 0.1 | <i>f</i> 36.1 ± 0.1 | <i>d,e</i> 37.4 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 3min | 31.9 ± 0.3 | 33.9 ± 0.2 | <i>f</i> 36.1 ± 0.1 | <i>d,e</i> 37.4 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 6min | 31.9 ± 0.4 | 34.0 ± 0.2 | <i>f</i> 36.2 ± 0.0 | <i>d,e</i> 37.4 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 9min | 32.3 ± 0.4 | 34.3 ± 0.2 | <i>f</i> 36.5 ± 0.1 | <i>d,e</i> 37.5 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 12min | 33.0 ± 0.4 | 35.0 ± 0.2 | <i>f</i> 37.0 ± 0.1 | <i>d,e</i> 37.8 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | End | 34.1 ± 0.4 | 35.9 ± 0.3 | <i>f</i> 37.8 ± 0.1 | 38.2 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | Tmc | Rest | 34.3 ± 0.2 | 34.0 ± 0.2 | 34.2 ± 0.2 | 34.0 ± 0.2 |
| Start | | 30.6 ± 0.7 | 32.2 ± 0.3 | 34.5 ± 0.2 | <i>d,e</i> 36.7 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| 3min | | 30.5 ± 0.7 | 32.2 ± 0.3 | 34.5 ± 0.2 | <i>d,e</i> 36.7 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| 6min | | 30.8 ± 0.7 | 32.5 ± 0.4 | 34.8 ± 0.18 | <i>d,e</i> 36.8 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| 9min | | 31.8 ± 0.6 | 33.1 ± 0.4 | 35.4 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.1 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| 12min | | 32.9 ± 0.5 | 34.0 ± 0.4 | 36.1 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.3 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| End | | 33.9 ± 0.5 | 35.0 ± 0.6 | 37.0 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.7 ± 0.2 | <i>a,b,c</i> |
| Tmm | | Rest | 34.7 ± 0.2 | 34.3 ± 0.2 | 34.8 ± 0.2 | 34.3 ± 0.2 |
| | Start | 31.3 ± 0.4 | 33.1 ± 0.3 | <i>f</i> 35.3 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.0 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 3min | 31.2 ± 0.4 | 33.1 ± 0.3 | <i>f</i> 35.3 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.0 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 6min | 31.3 ± 0.4 | 33.2 ± 0.3 | <i>f</i> 35.5 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.1 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 9min | 32.0 ± 0.4 | 33.7 ± 0.3 | <i>f</i> 35.9 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.3 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | 12min | 33.0 ± 0.3 | 34.5 ± 0.3 | <i>f</i> 36.5 ± 0.2 | <i>d,e</i> 37.6 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |
| | End | 34.0 ± 0.3 | 35.4 ± 0.3 | <i>f</i> 37.4 ± 0.2 | <i>d,e</i> 38.0 ± 0.1 | <i>a,b,c</i> |

The data are expressed as the mean ± standard error. Significant differences (p<0.05) were described as: *a*, HOT vs. COLD; *b*, HOT vs. COOL; *c*, HOT vs. WARM; *d*, WARM vs. COLD; *e*, WARM vs. COOL; *f*, COLD vs. COOL.

Table 3-2. The peak oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\text{peak}}$), time to exhaustion (TTE), and maximum heart rate (HR_{max}) during graded exercise test under the four conditions.

| | COLD | COOL | WARM | HOT |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| $VO_{2\text{peak}}$ (ml/kg/min) | 50.4 ± 4.3 | 50.7 ± 3.8 | 53.4 ± 3.8 | 52.9 ± 3.9 |
| TTE (min) | 15.1 ± 0.5 | 15.2 ± 0.5 | 15.7 ± 0.4 | 15.3 ± 0.5 |
| HR_{max} (bpm) | 164 ± 5.3 ^{*,#} | 170 ± 5.6 [§] | 179 ± 5.3 [#] | 183 ± 3.7 ^{*,§} |

The data are expressed as the mean ± standard error. Significant differences ($p < 0.05$) were described as: *HOT vs. COLD; §HOT vs. COOL; #WARM vs. COLD

第4章

総括

第1節 本研究のまとめ

第2節 結論

第1節 本研究のまとめ

本研究では、間欠的運動である繰り返しスプリントサイクリング (Repeated sprint cycling, RSC) と有酸素性運動能力を評価するための多段階漸増負荷テスト (Graded exercise test, GXT) を研究対象として、水循環ズボンを使用して下半身を加温・冷却する4つの温度条件 (大腿部・下腿部の平均深部温度がおよそ 38°C[HOT], 36°C[WARM], 34°C[COOL], 32°C[COLD]) を設定し、中性温環境 (室温約 24 度) で RSC と GXT が発揮する運動パフォーマンスにおよぼす身体の温熱状態の影響を明らかにすることを目的とした。

本研究で明らかになったことは以下の通りである。

- 1) 8秒の最大自転車漕ぎ運動を40秒間の休息をはさんで8回繰り返すRSCを実施した結果、RSC前半については、加温条件 (WARM・HOT) は冷却条件 (COLD・COOL) よりも生理的負担 (心拍数・主観的運動強度) が高く、特にHOT条件においては温熱ストレス (鼓膜温上昇・総発汗量) が高かったにもかかわらず、運動パフォーマンス (平均パワー・ピークパワー・総仕事量) は加温条件が高かった。しかし RSC 後半は4つの温度条件間で運動パフォーマンスの違いは見られなかった。

たことから、RSCのパフォーマンスに与える活動筋温の影響はRSC前半が大きく、後半では小さいことが明らかになった。

- 2) 自転車エルゴメーターを使用して1分毎に運動負荷を増加させるGXTを実施した結果、加温条件(WARM・HOT)は冷却条件(COLD・COOL)よりも温熱ストレスは高かったが、運動パフォーマンス(酸素摂取動態やその最大値、及び疲労困憊までの運動時間)には4つの温度条件間で顕著な違いが見られなかった。したがって20分以内で終了するGXTのパフォーマンスに与える身体の温熱状態の影響は少ないことが示された。

第2節 結論

本研究では運動形態が異なるとパフォーマンスに与える身体の温熱状態の影響も異なることが示され、スポーツや運動時のパフォーマンスを向上させるためのウォームアップやプレクーリングの内容を決める場合には、運動形態別に検討する重要性が示された。

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上でご指導、ご鞭撻、ご支援いただいた方々に感謝の意を表します。

研究活動全般にわたり格別なるご指導とご高配を賜りました京都工芸繊維大学教授、芳田哲也先生に甚大なる謝意を表します。私が博士論文をまとめることができたのは、芳田先生の熱心なご指導があったからに他なりません。国際誌へ投稿するノウハウを教えていただいたり、国際学会で発表する機会を与えてくださったり、国際的な感覚を持つことの重要性を教えてくださいました。

研究の考え方や進め方、またたくさんのご助言をいただきました京都工芸繊維大学助教、山下直之先生に深く感謝いたします。また京都光華女子大学教授、佐竹敏之先生、京都文教短期大学准教授、久米雅先生には、大変貴重な助言や励ましの言葉をいただきました。大変感謝しております。

本研究を遂行するうえで、実験に快く参加してくださいました被験者の方々に対し、心より御礼申し上げます。何度も、何度も、暖められたり冷やされたり、本当に大変な実験だったと思います。

最後に、50歳半ばの私が大学院博士後期課程に進学することに理解を示し、常に応援してくれた親愛なる2人の子どもたちに感謝の意を表します。離れて暮らしていても、2人の存在そのものが本当に心の支えになりました。またスキーに行こうね。

参 考 文 献

- Aleksander T, Szczepan W, Tomasz P, Zbigniew S, Anna T, and Tomasz C. Effects of ambient temperature on physiological responses to incremental exercise test. *J Hum Kinet* 26: 57-64, 2010.
- Almudehki F, Girard O, Grantham J, and Racinais S. Hot ambient conditions do not alter intermittent cycling sprint performance. *J Sci Med Sport* 15: 148-152, 2012.
- Åstrand PO, and Rodahl K. *Textbook of Work Physiology*. New York: McGraw Hill Book Company; 1986.
- Ball D, Burrows C, and Sargeant AJ. Human power output during repeated sprint cycle exercise: the influence of thermal stress. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 79: 360-366, 1999
- Bangsbo J, Krstrup P, Gonzalez-Alonso J, and Saltin B. ATP production and efficiency of human skeletal muscle during intense exercise: effect of previous exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 280: E956-964, 2001.
- Beaven CM, Kilduff LP, Cook CJ. Lower-Limb Passive Heat Maintenance Combined With Pre-cooling Improves Repeated Sprint Ability. *Front Physiol* 9: 1064, 2018.
- Bentley DJ, Newell J, and Bishop D. Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes *Sports Med* 37: 575-586, 2007.
- Bergh U, and Ekblom B. Influence of muscle temperature on maximal muscle strength and power output in human skeletal muscles. *Acta Physiol Scand* 107: 33-37, 1979a.

- Bergh U, Ekblom B. Physical performance and peak aerobic power at different body temperatures. *J Appl Physiol Respor Environ Exerc Physiol* 46:885-889, 1979b.
- Billat VL, Flechet B, Petit B, Muriaux G, and Koralsztein JP. Interval training at $\dot{V}O_2\text{max}$: effects on aerobic performance and overtraining markers. *Med Sci Sports Exerc* 31: 156-163, 1999.
- Bishop D, Edge J, Davis C, and Goodman C. Induced metabolic alkalosis affects muscle metabolism and repeated-sprint ability. *Med Sci Sports Exerc* 36: 807-813, 2004.
- Bishop D. Warm up I: Potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Med* 33: 439-454, 2003.
- Bogerd N, Perret C, Bogerd CP, Rossi R, and Daanen HAM. The effect of pre-cooling intensity on cooling efficiency and exercise performance. *J Sports Sci* 28: 771-779, 2010.
- Booth J, Wilsmore BR, Macdonald AD, Zeyl A, Mcghee S, Calvert D, *et al.* Whole-body pre-cooling does not alter human muscle metabolism during sub-maximal exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* 84: 587-590, 2001.
- Castle PC, Macdonald AL, Philp A, Webborn A, Watt PW, and Maxwell NS. Precooling leg muscle improves intermittent sprint exercise performance in hot, humid conditions. *J Appl Physiol* (1985) 100: 1377-1384, 2006.
- Chevront SN, Carter III R, and Sawka MN. Fluid balance and endurance exercise performance. *Curr Sports Med Rep* 2: 202-208, 2003.
- Danek N, Michalik K, Hebisz R, and Zatoń M. Influence of warm-up prior to incremental exercise test on aerobic performance in physically active men. *Pol J Sport Tourism* 26: 9-13, 2019.

- Demachi K, Yoshida T, and Tsuneoka H. Relationship between mean body temperature calculated by two- or three-compartment models and active cutaneous vasodilation in humans: a comparison between cool and warm environments during leg exercise. *Int J Biometeorol* 56: 277-285, 2012.
- deVries HA, and Housh TJ, Warming up. *Physiology of exercise for physical education, athletics and exercise science*. 5th Ed., Brown & Benchmark, New York, pp527-539, 1994
- Drust B, Rasmussen P, Mohr M, Nielsen B, and Nybo L. Elevations in core and muscle temperature impairs repeated sprint performance. *Acta Physiol Scand* 183: 181-190, 2005.
- Duffield R, and Marino FE. Effects of pre-cooling procedures on intermittent-sprint exercise performance in warm conditions. *Eur J Appl Physiol* 100: 727-735, 2007.
- Duffield R, and Marino FE. Effects of pre-cooling procedures on intermittent-sprint exercise performance in warm conditions. *Eur J Appl Physiol* 100: 727-735, 2007
- Edwards RH, harris RC, Hultman E, Kaijser L, Koh D, and Nordesjö LO. Effect of temperature on muscle energy metabolism and endurance during successive isometric contractions, sustained to fatigue, of the quadriceps muscle in man. *J Physiol* 220: 335-352, 1972.
- Ely BR, Chevront SN, Kenefick RW, and Sawka MN. Aerobic performance is degraded, despite modest hyperthermia, in hot environments. *Med Sci Sports Exerc* 42: 135-141, 2010.
- Febbraio MA, Carey MF, Snow RJ, Stathis CG, and Hargreaves M. Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise. *Am J Physiol* 271: R1251-1255, 1996.

- Fox RH, Solman AJ, Isaacs R, Fry AJ, and McDonald IC. A new method for monitoring deep body temperature from the skin surface. *Clin Sci* 44: 81-86, 1973.
- Fujimoto T, Sasaki Y, Wakabayashi H, Sengoku Y, Tsubakimoto S, and Nishiyasu T. Maximal workload but not peak oxygen uptake is decreased during immersed incremental exercise at cooler temperatures. *Eur J Appl Physiol* 116: 1819-1827, 2016.
- Gaitanos GC, Williams C, Boobis L, and Brooks S. Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol* (1985) 75: 712-719, 1993.
- Girard O, Bishop DJ, and Racinais S. Hot conditions improve power output during repeated cycling sprints without modifying neuromuscular fatigue characteristics. *Eur J Appl Physiol* 113: 359-369, 2013.
- Girard O, Mendez-Villanueva A, and Bishop D. Repeated-sprint ability – Part 1: Factors contributing to fatigue. *Sports Med* 41: 673-694, 2011.
- González-Alonso J, and Calbet J. Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation* 107: 824-830, 2003.
- 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* (1985) 86: 1032-1039, 1999.
- Gray SR, Vito GD, Nimmo MA, Farina D, and Ferguson RA. Skeletal muscle ATP turnover and muscle fiber conduction velocity are elevated at higher muscle temperatures during maximal power output development in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290: R376-382, 2006.

- Gregson WA, Drust B, Batterham A, and Cable NT. The effects of pre-warming on the metabolic and thermoregulatory responses to prolonged submaximal exercise in moderate ambient temperatures. *Eur J Appl Physiol* 86: 526-533, 2002.
- Imai D, Takeda R, Suzuki A, Naghavi N, Yamashina Y, Ota A, *et al.* Effects of skin surface cooling before exercise on lactate accumulation in cool environment. *Eur J Appl Physiol* 118: 551-562, 2018.
- Inoue K, Yamashita N, Kume M, and Yoshida T. Differences in the repeated sprint performance between the first and latter halves of trials under conditions of several thermal states in exercising muscles. *J Strength Cond Res* 35: 782-790, 2021.
- Johnson MA, Gregson IR, Mills DE, Gonzalez JT, and Sharpe GR. Inspiratory muscle warm-up does not improve cycling time-trial performance. *Eur J Appl Physiol* 114: 1821-1830, 2014.
- Jones AM, Koppo K, and Burnley M. Effects of prior exercise on metabolic and gas exchange responses to exercise. *Sports Med* 33: 949-971, 2003.
- Karvonen, J. Importance of warm up and cool down on exercise performance. In: *Medicine and sports training and coaching*. J. Karvonen, P.W.R. Lemon and I. Iliev, eds. Basel: Karger, 1992. pp. 190-213.
- Koga S, Shiojiri T, Kondo N, and Barstow TJ. Effect of increased muscle temperature on oxygen uptake kinetics during exercise. *J Appl Physiol* (1985) 83: 1333-1338, 1997.
- Lafrenz AJ, Wingo JE, Ganio MS, and Cureton KJ. Effect of ambient temperature on cardiovascular drift and maximal oxygen uptake. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1065-1071, 2008.
- Lee DT, and Haymes EM. Exercise duration and thermoregulatory responses after whole body precooling. *J Appl Physiol* (1985) 79: 1971-1976, 1995.

- Lee DT, Toner MM, McArdle WD, Vrabas IS, and Pandolf KB. Thermal and metabolic responses to cold-water immersion at knee, hip, and shoulder levels. *J Appl Physiol* (1985) 82: 1523-1530, 1997.
- Linnane DM, Bracken RM, Brooks S, Cox VM, and Ball D. Effects of hyperthermia on the metabolic responses to repeated high-intensity exercise. *Eur J Appl Physiol* 93: 159-166, 2004.
- Matsukawa T, Kashimoto S, Ozaki M, Shindo and S, Kumazawa T. Temperatures measured by a deep body thermometer (Coretemp) compared with tissue temperatures measured at various depths using needles placed into the sole of the foot. *Eur J Anaesthesiol* 13: 340-345, 1996.
- Matsuura R, Arimitsu T, Yunoki T, Kimura T, Yamanaka R, and Yano T. Effects of heat exposure in the absence of hyperthermia on power output during repeated cycling sprints. *Biol Sports* 32: 15-20 2015.
- McGawley K, and Bishop D. Anaerobic and aerobic contribution to two, 5 × 6-s repeated-sprint bouts. *Coach Sport Sci J* 3: 52, 2008.
- Minett GM, Duffield R, Marino FE, and Portus M.. Duration-dependant response of mixed-method pre-cooling for intermittent-sprint exercise in the heat. *Eur J Appl* 112: 3655-66, 2012
- Mitchell JB, Mcfarlin BK, and Dugas JP. The effect of pre-exercise cooling on high intensity running performance in the heat. *Int J Sports Med* 24: 118-124, 2003.
- Mitchell JW, Nadel ER, and Stolwijk JAJ. Respiratory weight losses during exercise. *J Appl Physiol* 32: 474-476, 1972.

- Mohr M, Rasmussen P, Drust B, Nielsen B, Nybo L. Environmental heat stress, hyperammonemia and nucleotide metabolism during intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol* 97: 89-95, 2006.
- Morrison S, Sleivert GG and Cheung SS. Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. *Eur J Appl Physiol* 91: 729-736, 2004.
- Muravchick S. Deep body thermometry during general anesthesia. *Anesthesiology* 58: 271-275, 1983.
- Nagamine S, and Suzuki S. Anthropometry and body composition of Japanese young men and women. *Human Biol* 36: 8-15, 1964.
- Nielsen B. Solar heat load: heat balance during exercise in clothed subjects. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 60: 452-456, 1990.
- Nielsen, B, Hales, JRS, Strange, S, Christensen, NJ, Warberg, J, and Saltin, B. Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J Physiol* 460: 467-485, 1993.
- Nybo L, and Nielsen B. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol* (1985) 91: 1055-1060, 2001.
- Nybo L, Jensen T, Nielsen B, and Gonzalez-Alonso J. Effects of marked hyperthermia with and without dehydration on VO_2 kinetics during intense exercise. *J Appl Physiol* (1985) 90: 1057-1064, 2001.
- Oksa J, Rintamäki H, and Rissanen S. Muscle performance and electromyogram activity of the lower leg muscles with different levels of cold exposure. *Eur J Appl Physiol* 75: 484-490, 1997.

- Paradisis GP, Zacharogiannis E, Mandila D, Smirtiotou A, Argeitaki P, and Cooke CB. Multi-stage 20-m shuttle run fitness test, maximal oxygen uptake and velocity at maximal oxygen uptake. *J Hum Kinet* 41: 81-87, 2014.
- Parolin ML, Chesley A, Matsos MP, Spriet LL, Jones NL, and Heigenhauser GJF. Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am J Physiol* 277: E890-900, 1999.
- Pearson J, Low DA, Stöhr E, Kalsi K, Ali L, Barker H, *et al.* Hemodynamic responses to heat stress in the resting and exercising human leg: insight into the effect of temperature on skeletal muscle blood flow. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 300: R663-673, 2011.
- Periard JD, Cramer MN, Chapman PG, Caillaud C, and Thompson MW. Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Exp Physiol* 96: 134-144, 2011.
- Pierce SJ, Hahn A G, Davie A, and Lawton EW. Prolonged incremental tests do not necessarily compromise VO_2max in well-trained athletes. *J Sci Med Sport* 2: 356-363, 1999.
- Racinais, S, and Oksa, J. Temperature and neuromuscular function. *Scand J Med Sci Sports* 20 (Suppl. 3): 1-18, 2010.
- Racinais, S, Gaoua N, and Grantham J. Hyperthermia impairs short-term memory and peripheral moter drive transmission. *J Physiol* 586: 4751-4762, 2008.
- Roberts MF, Wenger CB, Stolwijk JAJ, and Nadel ER. Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 43: 133-37, 1977.

- Rollnik JD, Witt K, Hänert W, Rix W, and Schwindt M. Rescue lifting system (RLS) might help to prevent death after rescue from immersion in cold water. *Int J Sports Med* 22: 17-20, 2001.
- Saltin B, Gagge AP, and Stolwijk JAJ. Muscle temperature during submaximal exercise in man. *J Appl Physiol* 25: 679-688, 1968.
- Sargeant, AJ. Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *Eur J Appl Physiol* 56: 693-698, 1987.
- Schmidt V, and Brück K. Effect of a precooling maneuver on body temperature and exercise performance. *J Appl Physiol* 50: 772-778, 1981.
- Smolander J, Kolari P, Korhonen O, and Ilmarinen R. Aerobic and anaerobic responses to incremental exercise in a thermoneutral and a hot dry environment. *Acta Physiol Scand* 128: 15-21, 1986.
- Spencer, M, Bishop, D, Dawson, B, and Goodman, C. Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Med* 35: 1025-1044, 2005.
- Stolwijk JAJ, and Hardy JD. Temperature regulation in man – A theoretical study. *Pflügers Archiv* 291: 129-162, 1966.
- Takizawa K, Yamaguchi T, and Shibata K. Warm-up exercises may not so important for enhancing submaximal running performance. *J Strength Cond Res* 32: 1383-1390, 2018.
- Thornley, LJ, Maxwell, NS, and Cheung, SS. Local tissue temperature effects on peak torque and muscular endurance during isometric knee extension. *Eur J Appl Physiol* 90: 588-594, 2003.

- Tucker R, Marle T, Lambert EV, and Noakes TD. The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol* 574: 905-915, 2006.
- Tyler C, and Sunderland C. The effect of ambient temperature on the reliability of a preloaded treadmill time-trial. *Int J Sports Med* 29: 812-816, 2008.
- Wegmann M, Faude O, Poppendieck W, Hecksteden A, Fröhlich M, and Meyer T. Pre-cooling and sports performance: A meta-analytical review. *Sports Med* 42: 545-564, 2012.
- Wingo JE, Lafrenz AJ, Ganio MS, Edwards GL, and Cureton KJ. Cardiovascular drift is related to reduced maximal oxygen uptake during heat stress. *Med Sci Sports Exerc* 37: 248-255, 2005.
- Wright V. Stiffness: a review of its measurement and physiological importance. *Physiotherapy* 59: 107-111, 1973.
- Yaicharoen P, Wallman K, Bishop D, Morton A. The effect of warm up on single and intermittent-sprint performance. *J Sports Sci* 30: 833-840, 2012.
- Yamakage, M, and Namiki, A. Deep temperature monitoring using a zero-heat-flow method. *J Anesth* 17: 108-115, 2003.
- Yanagisawa O, Homma T, Okuwaki T, Shimano D, and Takahashi H. Effects of cooling on human skin and skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol* 100: 737-745, 2007.