

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

身体冷却としてのプレクーリングと
ポストクーリングにおける効果の性差

Sex differences in pre-cooling and
post-cooling effects as body cooling

2021年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

岩田 理沙

IWATA, Risa

研究指導教員： 村岡 功 教授

本論文は以下の掲載論文および現在査読中の論文をまとめたものである

- 1) Risa Iwata, Takuji Kawamura, Yuri Hosokawa, Lili Chang, Katsuhiko Suzuki and Isao Muraoka. (2020) Differences between sexes in thermoregulatory responses and exercise time during endurance exercise in a hot environment following pre-cooling with ice slurry ingestion. *Journal of Thermal Biology*, **94** (102746) (実験 1)

- 2) Risa Iwata, Lili Chang, Hiroshi Akiyama, Takuji Kawamura, Katsuhiko Suzuki and Isao Muraoka. (2021, In press) The effects of sex differences on delayed-onset muscle soreness by cold-water immersion following resistance exercise, *Gazz Med Ital* (実験 3)

目次

第一章	研究の背景と目的.....	1
第二章	文献考証.....	5
2.1.	プレクーリング.....	5
2.1.1.	運動パフォーマンスへの効果.....	5
2.1.2.	アイススラリーによるプレクーリング.....	7
2.2.	ポストクーリング.....	8
2.2.1.	運動誘発性高体温への効果.....	9
2.2.2.	炎症反応および筋肉痛の抑制への効果.....	10
2.3.	性差の影響.....	10
2.3.1.	体温調節機能.....	11
2.3.2.	身体冷却.....	13
2.3.4.	遅発性筋肉痛.....	14
第三章	アイススラリーによるプレクーリングが暑熱環境下における持久性運動時の体温調節機能に与える性差の影響.....	15
3.1	緒言.....	15
3.2	方法.....	16
3.3	結果.....	22
3.4	考察.....	31
第四章	持久性運動後のアイススラリー摂取が体温調節機能に与える性差の影響.....	35
4.1	緒言.....	35
4.2	方法.....	36
4.3	結果.....	38
4.4	考察.....	43

第五章	レジスタンス運動後の冷水浴が遅発性筋肉痛に与える性差の影響.....	47
5.1	緒言.....	47
5.2	方法.....	48
5.3	結果.....	53
5.4	考察.....	62
第六章	総合討論.....	66
6.1.	本研究の成果.....	66
6.2.	今後の展望.....	68
参考文献	70
謝辞	89

略語・略号一覧

略語	英語	日本語
CIR	Mid-thigh circumference	大腿周径囲
CMJ	Counter movement jump	カウンタームーブメントジャンプ
CK	Creatine kinase	クレアチンキナーゼ
DOMS	Delayed onset muscle soreness	遅発性筋肉痛
Mb	Myoglobin	ミオグロビン
NEUT	Neutrophil	好中球数
RER	Respiratory exchange ratio	呼吸交換比
ROM	Range of motion	関節可動域
RPE	Rating of perceived exertion	主観的運動強度
VO ₂	Oxygen uptake	酸素摂取量
VO ₂ max	Maximal oxygen uptake	最大酸素摂取量
WBC	White blood cell	白血球数
1RM	1 repetition maximum	最大挙上重量

第一章 研究の背景と目的

運動時における身体冷却は、目的によって方法とタイミングが使い分けられている。それらには、運動の前にあらかじめ体温を低下させることを目的として行うプレクーリング、運動中や運動の間に体温の低下や疲労感の軽減を目的に行うミッドクーリング（パークーリング）、運動後速やかに体温を低下させることや炎症の抑制を目的として行うポストクーリングがある(Bongers *et al.*, 2017)。特に暑熱環境下における運動時には、体温の上昇によって運動パフォーマンスが低下し、熱中症のリスクも高まることから、スポーツ現場では様々な方法で身体冷却が行われてきた。実際に、高温多湿な環境下での国際大会では棄権者が続出したことや、学校教育の現場で熱中症の死亡事故が無くならないことが大きな問題として取り上げられている。そのため、スポーツ科学の分野において身体冷却を最適化するためのデータ取得は、年々気温が上昇する現代において非常に重要な課題であるといえる。

プレクーリングは、暑熱環境下における持久性パフォーマンスを向上させることが報告されており、その方法として、冷水浴、クーリングベスト、冷水/アイスラリー摂取、クーリングパック、その他組み合わせなどが挙げられる。あらかじめ体温を低下させておくプレクーリングは暑熱下での運動継続時間を延長させ(Sugenoya & Ogawa, 1985)、運動誘発性の高体温（hyperthermia）のリスクを低減させることから、それに関連する熱中症のリスクも低減させることが期待できる。プレクーリングが効果的なのは、活動筋の冷却は筋の代謝を低下させて、スプリントパフォーマンスなどの瞬発的な筋発揮を低下させてしまうことから、スプリントパフォーマンス競技者よりも、持久性競技者であることが報告されている(Bongers *et al.*, 2017)。

これを運動中や運動間に行うミッドクーリングと併用するとパフォーマンスの改善により効果的であることが報告されている(Bongers *et al.*, 2015)。また近年、筋温を低下させることなく、深部体温を低下させる方法として、アイスラリー摂取による冷却が用いられている(Mueller, 2003)。アイスラリーはシャーベット状の飲料で、中に含まれている

氷が体内で溶けることによって深部体温を低下させる(Tan & Lee, 2015)。実際に競技者たちの間ではプレクーリングとしての使用が広まっていることも報告されている(Périard *et al.*, 2017)。特別な場所や施設が必要ないことから、実用的な方法であるといえる。

ポストクーリングは、運動後に行うクーリングであり、体温指標の速やかな回復だけでなく、筋肉痛の抑制にも効果的である。暑熱環境下での運動後における、体温の高さと高体温の持続時間は、熱中症の死亡リスクを高めることから、冷却によって体温を速やかに低下させることが重要である(Smith 2005; Howe & Boden 2007)。プレクーリングやミッドクーリングと比較して、ポストクーリングでは時間や施設の制限が少ないことから、冷却効果の大きい冷水浴を用いることが多い。特に冷水浴には、遅発性筋肉痛 (Delayed onset muscle soreness; DOMS) を抑制する効果があることから注目されている。DOMS は、不慣れな運動や高強度での伸張性運動によって引き起こされ、運動後 24~72 時間の間に痛みのピークが発現して、運動後 5~7 日間で消失することが報告されている (Cheung *et al.*, 2003)。疲労感や心理的な不快感を伴い、運動意欲の低下のみならず競技パフォーマンスの低下にも直結するため(Russell *et al.*, 2016)、DOMS を抑制する目的として行うポストクーリングも重要である。

このように身体冷却では、目的によって冷却方法やタイミングを使い分けることが重要であると考えられる。しかしながら、冷却の効果、特に冷水浴には個人差および性差があるといわれており (Stephens *et al.*, 2018)、体脂肪率や骨格筋量などの違いがその差を生じさせている可能性が指摘されている (McArdle *et al.* 1992; Stephens *et al.* 2017)。男女の生理学的機能には、身体組成、体力および性ホルモンによる差が影響すると考えられており、一般的に男女では体重や身長他に、脂肪量、筋肉量にも差があることが知られている (Bredella, 2017)。

運動時の体温調節では、骨格筋による熱産生や体表面積による代謝性熱産生量の差によって、影響が異なることが考えられる。そのため、代謝性熱産生量を統一した場合には、体

表面積の小さい女性では、熱ストレスが大きくなる(Gagnon *et al.*, 2009)。さらに、有酸素能力の絶対値は男性の方で女性よりも高いことが知られており、発汗機能に関連することが報告されている(Jay *et al.*, 2011)。また、女性ではプロゲステロンとエストロゲンが上昇する黄体期において安静時の深部体温は 0.3~0.5°C 上昇し、エストロゲンが上昇する卵胞期には血漿量が増加するとされている(Gagnon & Kenny, 2012a)。血漿量を維持することは暑熱環境下において重要であり、このことにより暑熱環境下における運動パフォーマンスは、黄体期では低下することが示されている(Jonge *et al.* 2012)。これらのことから、運動と身体冷却を最適化するために性差を考慮することは、重要な課題であると考えられる。

先行研究では、運動後の冷水浴では、男性よりも女性で早く体温が低下したことが報告されており、冷却効果には除脂肪量が関連していることを報告している(Lemire *et al.*, 2009)。しかしながら、回復を目的とする方法での DOMS に対する効果において、身体組成の大きく異なる男女で同様の効果が得られるか否かについては明らかにされていない。また、内部冷却による冷却効果に性差が影響するか否かについても未だ明らかとなっていない。さらに、暑熱環境下における運動時での体温調節能は男女で異なり、発汗量(Kaciuba-Uscilko & Grucza, 2001)や体表面積(Gagnon *et al.*, 2009)の影響から、女性では調節不可能な熱ストレスが大きくなるといわれている(Gagnon *et al.*, 2009)。そのため、暑熱環境下における身体冷却は特に重要であり、冷却効果に及ぼす性差の影響を明らかにすることが必要であると考えられる。

実際に、運動を伴う身体冷却の場合には、女性では男性よりも多くの冷却が必要であることを報告した研究も存在する(Vargas *et al.*, 2019)。中でも、アイススラリーを用いた内部冷却では、男性では多くの先行研究においてパフォーマンスの改善が報告されているにも拘らず、これまでに女性で運動パフォーマンスが改善したという報告はなされていない。そのため、性差の影響を明らかにしたうえで、女性にとって適切な冷却戦略を提案するための手がかりを得ることは、女性アスリートにとって重要な知見になるものと考えられる。

以上のことから、本研究では身体冷却としてのプレクーリングとポストクーリングにおける性差の影響を明らかにするために、体温調節機能および DOMS の観点から、以下の研究課題について検討を行った。

【研究課題 1：アイススラリーによるプレクーリングが暑熱環境下における持久性運動時の体温調節機能に与える性差の影響】

【研究課題 2：持久性運動後のアイススラリー摂取が体温調節機能に与える性差の影響】

【研究課題 3：レジスタンス運動後の冷水浴が遅発性筋肉痛に与える性差の影響】

第二章 文献考証

2.1. プレクーリング

身体冷却に関する研究は 1930 年代から行われており (Bazett *et al.*, 1937)、運動パフォーマンスに関連する身体冷却についての研究は、1970 年ごろから運動開始時の体温に着目して検討されていた (Bergh & Ekblom, 1979)。当初の研究は常温環境下で行われており、0～5°C の環境下に暴露することによる身体冷却が運動開始時の体温を低下させ、持久性運動パフォーマンスを改善したと報告されている (Schmidt & Bruck 1981; Hessemer *et al.* 1984; Olschewski & Bruck 1988; Lee & Haymes 1995)。その後 Booth らは、暑熱環境下においても冷水浴による運動前の体温の低下が、その後の持久性運動パフォーマンスを改善させることを報告し (Booth *et al.*, 1997)、プレクーリングによる運動パフォーマンスへの検討は、暑熱環境下で行われるものがほとんどになっていった。

さらに、パフォーマンス改善を目的とした身体冷却は、冷水浴や冷気を用いた方法からアイスベストが用いられるようになり (Cotter *et al.*, 2001; Arngrímsson *et al.*, 2004)、実用的な方法へと移行した。2010 年代に入ると、アイススラリーを用いたプレクーリングの研究が増加し、プレクーリングの代表的な方法として確立された (Siegel *et al.*, 2010; Morris *et al.*, 2016; Choo *et al.*, 2018)。近年では、2 種類以上の冷却方法を組み合わせて行う (アイススラリーとアイスベスト、ネッククーリングなど) コンビネーションクーリングが最も効果的であるといわれ、研究が進められている (Rodríguez *et al.*, 2020)。

2.1.1. 運動パフォーマンスへの効果

長時間の運動は体内の代謝に比例して深部体温を上昇させる。特に、暑熱環境下での運動は、熱の産生に対して熱の放散が間に合わず、過度な体温の上昇を引き起こす。ヒトの体は、高体温による細胞の破壊や熱中症などの危険を避けるために、自ら運動の強度やペースを落とすように調節する。そのため、暑熱環境下における長時間の運動では、常温環境下での

運動に比較して、運動パフォーマンスは低下することが知られている。プレクーリングは、このような暑熱環境下での運動の前にあらかじめ深部体温を低下させる身体冷却法のひとつである。プレクーリングは、一定時間内の運動量を増加させ(Hessemer *et al.*, 1984; Booth *et al.*, 1997; Kay *et al.*, 1999)、疲労困憊までの時間を延長させることが報告されている(Schmidt & Bruck 1981; Olschewski & Bruck 1988; Lee & Haymes 1995)。そのため、スポーツ現場では様々な方法が用いられてきた(Périard *et al.*, 2017)。

プレクーリングが運動パフォーマンスを改善するメカニズムは、主に深部体温の低下によって体内の熱貯蓄量を増大させることによる効果である(Olschewski & Bruck 1988; Lee & Haymes 1995; Booth *et al.* 1997; Kay *et al.* 1999; Siegel *et al.* 2010; Siegel *et al.* 2012; Burdon *et al.* 2010; Stevens *et al.* 2013; Ross *et al.* 2011; Jones *et al.* 2012)。運動時のペースや疲労は、フィードフォワードとフィードバック機能の両方で制御されており、環境温と熱ストレスなどが関連して運動強度や運動量を調整する。フィードフォワードによる予測機構は、熱貯蓄量によって影響を受けることが知られている(Cheung & Sleivert 2004)。外部冷却を用いたプレクーリングでは、暑熱環境下での運動の前に、一定時間寒冷環境下に暴露されることで、暑熱環境下に暴露されたときに、脳がその環境の変化に気づかずに運動強度の調節を開始することも、プレクーリングが運動パフォーマンスを改善するメカニズムの一つとして提唱されている(Quod *et al.*, 2006)。また、運動前の深部体温の低下は、運動パフォーマンスを低下させる危機的体温までの時間を延長させ、疲労を感じるポイントを遅らせる効果がある(Quod *et al.*, 2006)。

2つめのメカニズムは、熱ストレスによる循環器系へのストレスを低減させることである。プレクーリング後の運動では、同様の運動負荷において心拍数を低下させることが報告されている(Schmidt & Bruck 1981; Hessemer *et al.* 1984; Lee & Haymes 1995)。プレクーリングによって皮膚温や深部体温が低下すると、熱放散に利用される血流が減少し、中心動脈への還流を増加させることで、一回拍出量を増大させて心拍数を低下させる。熱放散のた

めの血流配分を減らすことには、ポジティブな影響もあるとされている。高体温が起こる環境下において、羊の腹部の血流量が低下したことが報告されており(Sakurada & Hales, 1998)、このような腹部の臓器からの血流再配分は、循環への腸からのエンドトキシン漏出をもたらし、エンドトキシン血症を誘発する(Davis & Bailey, 1997)。そのため、プレクーリングによって熱ストレスを低下させることは、腹部の血流低下を最小限にし、その結果、エンドトキシンなどの毒素の漏えいが遅れることでパフォーマンスを改善する可能性が示唆されている(Quod *et al.*, 2006)。

2.1.2. アイススラリーによるプレクーリング

これまでにプレクーリングは様々な方法で検討されてきた。プレクーリングに関する研究が開始された当初、冷却風による全身冷却や(Schmidt & Bruck 1981; Hessemer *et al.* 1984; Olschewski & Bruck 1988; Lee & Haymes 1995)、冷水浴(Booth *et al.* 1997; Castle *et al.* 2006; Quod *et al.* 2008; Duffield & Marino 2007; Mueller 2003; Smith *et al.* 2013; Nesser *et al.* 2008)が多く用いられてきた。しかしながら、冷却風はその環境が整っているところが少なく、実用性に欠けている。冷水浴は、大きな冷却効果を有しプレクーリングの方法として効果的であるといわれているが、実際のスポーツ現場での設置が難しいことも課題として挙げられている。また、冷水浴による筋肉の冷却は、筋の代謝を低下させる可能性も示唆されている(Bigland-Ritchie *et al.*, 1992; Febbraio *et al.*, 1994)。

近年のレビューでは、アイススラリー摂取による内部クーリングが、プレクーリングとして有効であると報告されている(Bongers *et al.*, 2017)。アイススラリーは、シャーベット状の飲料で、中に含まれる氷が体内で溶けることによる気化熱によって深部体温を効果的に低下させることができる(Tan & Lee, 2015)。そして、皮膚温や筋温を低下させることなしに深部体温を低下させることで、持久性運動パフォーマンスの改善に有効である(Burdon *et al.*, 2010; Siegel *et al.*, 2010; Ross *et al.*, 2011; Yeo *et al.*, 2012; Stevens *et al.*, 2013;

Schulze *et al.*, 2015)。さらに、アイススラリーによる冷却は、喉や胃腸にある温度受容体への刺激によって温熱感や熱快適感を改善させることが、パフォーマンスの改善に関連しているという報告もある(Schulze *et al.*, 2015)。また、水分補給と糖質摂取も同時に行えることから、実際の競技現場でも広く用いられている(Marquet *et al.*, 2015)。

一方で、アイススラリーによるプレクーリングは発汗量を低下させるとともに、発汗開始時間を遅らせるため、熱の放散能を低下させる可能性があるといわれている(Choo *et al.*, 2018)。そのため、高温低湿環境下よりも、熱放散能の関連が低い高温多湿環境下の方で効果的であることが示唆されている(Morris *et al.*, 2016)。しかしながら、アイススラリーによるプレクーリングでは総発汗量が同様であっても、体熱貯蓄量を増大させることから、全身の熱放散量を大きく損なうことなく、プレクーリングの効果を得ることができると示唆されている(Zimmermann *et al.* 2017b)。

2.2. ポストクーリング

運動後に行うポストクーリングは、体温の回復および筋損傷や炎症の抑制を目的に行われている(Duffield, 2008)。ポストクーリングの主な効果として、熱ストレスからの回復(Hausswirth *et al.* 2012)、筋温の低下に伴う炎症の抑制(Eston & Peters, 1999)、心拍数および一回拍出量の減少(Šrámek *et al.*, 2000)などが挙げられている。ポストクーリングは、筋肉痛の抑制を目的に用いられ始めたが(Kuligowski *et al.*, 1998)、後に暑熱下運動後の高体温に対しても用いられるようになった(Proulx *et al.*, 2003)。その後の研究では、筋損傷、炎症、DOMS の抑制と運動後高体温の回復の双方の目的で研究が進められているが、現在まで最も多く用いられている方法は冷水浴による冷却である(Julien, 2019)。冷水浴によるこの回復法は、運動後における熱中症を予防するためのゴールドスタンダードとして提唱されている(Casa *et al.*, 2007)。また、2010年代から-30~-135°Cの環境に暴露するクライオセラピーも体温の低下や筋損傷の抑制に効果的であることから(Hausswirth *et al.*

2011; Pournot *et al.* 2011)、スポーツの現場でも導入されている。しかしながら、設備の点からトップアスリートしか利用できないこともあり、汎用性の低いことが課題である。

ポストクーリングは、同日に 2 試合以上ある場合の競技間での介入や翌日以降の運動においてパフォーマンスを改善することが報告されている(Montgomery *et al.*, 2008; Pointon & Duffield, 2012; Pointon *et al.*, 2012; Stanley *et al.*, 2013; De Pauw *et al.*, 2014)。一方で、体温や疲労感の軽減は見られても、パフォーマンスや筋機能の改善は見られないという研究も存在する(Vaile *et al.* 2008a; Peiffer *et al.* 2009; Howatson *et al.* 2009; Rupp *et al.* 2012)。さらに、Roberts ら (2015) は、運動後の冷水浴は筋の適応を阻害するということが報告されている(Roberts *et al.*, 2015)。そのため、特に冷水浴によるポストクーリングは、高体温からの回復には確実に効果的であり、筋肉痛や筋損傷に関しても比較的効果的であることから、回復を目的として用いることが適切であると考えられる。

2.2.1. 運動誘発性高体温への効果

運動誘発性の高体温では、筋痙攣に始まり、熱射病までの症状を引き起こし、早急に治療をしなければ重篤な症状に至る危険性が高まる(Rae *et al.*, 2008; Epstein *et al.*, 2015)。特に熱射病は、アスリートにおける突然死の中でも広く知られた原因の一つである(Kerr *et al.*, 2013)。そのため、暑熱環境下において高体温を引き起こすような運動を行った後には、適切な冷却を行い、速やかに体温を低下させることが重要である。熱中症による重篤化リスクが高まるのは、深部体温が 38.9°C を超えたところからであり、30 分以内にそれを低下させることが理想的であるといわれている(Casa *et al.*, 2015)。

運動後に行うポストクーリングは、心拍数、深部体温、筋温などを早急に低下させることにより、早急な回復を促進することができる。ポストクーリングは、運動終了後に行うことから、プレクーリングやミッドクーリングに比較して、時間や設備を十分に使うことが可能である。一方で、より多くの人が熱中症予防のために身体冷却を行う際には、簡便な方法を

用いることも重要である。これまでに、プレクーリングにおいて用いられてきたアイススラリーによる冷却効果は、ポストクーリングでの効果よりも高いことが報告されている(Stanley *et al.*, 2010)。この先行研究では、パフォーマンスの改善は見られていないものの、深部体温の低下が確認されていることから、運動後に発症する熱中症のリスクを低下させる可能性は考えられる。

2.2.2 炎症反応および筋肉痛の抑制への効果

身体冷却の中でもポストクーリングは、運動誘発性の高体温からの回復だけではなく、その後の筋の炎症反応や DOMS の抑制を目的として行われている。中でも冷水浴は、DOMS に最も効果的な方法であると報告されている(Bongers *et al.*, 2017)。Kuligowski ら(Kuligowski *et al.*, 1998)は、上肢の伸張性運動後の冷水浴が DOMS を抑制することを初めて報告したが、この先行研究を始めとして、冷水浴を用いた研究では、伸張性レジスタンス運動後の DOMS や筋損傷を抑制するという報告が多く見受けられる。また、Vaile らは、チームスポーツの試合やそれを模した運動の後でも、冷水浴は DOMS を抑えてパフォーマンスを改善することを報告している(Vaile *et al.* 2008b)。その一方で、筋を短縮性収縮の直後に急激に伸長させることによってその後に大きな力を引き起こすようなプライオメトリックな運動後の冷水浴においては、DOMS に対する効果が得られない(Jakeman *et al.*, 2009)ことや、レジスタンス運動の鍛錬者では冷水浴の効果は得られにくい(Jajtner *et al.*, 2015)という報告もある。しかし Leeder らは、メタ分析によって運動後の冷水浴は DOMS を軽減するのに効果的な方法であると結論付けている(Leeder *et al.*, 2012)。

2.3. 性差の影響

性差が生じる原因として挙げられるのは、身体組成による違い、体力による違いおよび性ホルモンによる違いである。身長、体重、体表面積、筋肉量、徐脂肪量は男性で多く、脂肪

量、体脂肪率は女性で多いのが一般的である。代謝性熱産生量は、体重に依存するため、身体の小さい女性では男性に比較して少ない一方で、熱放散量や冷却は、体表面積に依存するために、体表面積が大きい男性では熱放散能力が高いといえる(Hackney, 2017)。また、一般的に脂肪量は女性で多いことが知られているが、脂肪量が多い人では少ない人に比較して、代謝性熱産生量を統一した場合の体温の上昇は大きいことが報告されている(Dervis *et al.*, 2016)。そのため、熱中症のリスクは肥満者で高く(Casa, 2018)、さらに女性で高いことが示されている(Kazman *et al.*, 2015)。さらに冷水浴中の研究では、筋肉には保温効果があり、筋肉量が多い人では体温を維持できること(Toner *et al.*, 1986)や、脂肪量が少ない人では多い人と比較して、核心温がより低下した(McArdle *et al.* 1984; Stephens *et al.* 2014)ことも報告されている。

次に、有酸素能力による差が挙げられる。有酸素能力 (VO_2 peak) の高い人では低い人に比べて、相対強度での運動において深部体温の上昇が大きいことが報告されている(Jay *et al.*, 2011)。しかしながら、これは代謝性熱産生量の影響であることが示されており、 VO_2 peak の高い人では代謝性熱産生量が高いことを示している。さらに、有酸素能力が高い人では体温の低下速度が遅いことが報告されている(Jacobs *et al.*, 1984)。

最後に、性ホルモンによる影響が挙げられる。女性ホルモンであるエストロゲンは血漿量を増加させるが、黄体期には血漿量が低下するために、体温調節に不利であることが指摘されている(Hackney, 2017)。また、男性ホルモンであるテストステロンの増加は、発汗反応を促進させ、女性ホルモンの増加は発汗機能を抑制することが示されている(井上 と 近藤 2010)。

2.3.1 体温調節機能

体温調節機能は、男女で異なる生理応答の一つである。体温調節機能における性差の多くは、身体的特徴によって生じるといわれている(Gagnon & Kenny 2012b; Gagnon & Kenny

2012a; Anderson *et al.* 1995; Havenith *et al.* 1995; Shapiro *et al.* 1981)。体重が重い人では、最大運動時の体温上昇が小さく (Havenith *et al.* 1998; Havenith *et al.* 1995)、体表面積の大きい人では体温の上昇が大きいことが報告されてきた (George *et al.* 1998; Havenith *et al.* 1995; Havenith & Middendorp 1990)。性差を生じさせるそのほかの原因として挙げられているのが、体力 (VO₂max) による違いである (Gagnon & Kenny 2012a; Havenith *et al.* 1995)。体力による差は、代謝性熱産生量の違いを生じさせることから、Gagnon らは運動中の熱ストレスにおける性差は代謝性熱産生量の違いによるものであることを示している (Gagnon *et al.*, 2008)。その後、代謝性熱産生量を統一した上で運動時の体温調節機能を検討する研究が増加した。代謝性熱産生量を統一した間欠性運動では、女性の深部体温の上昇が男性よりも大きくなったことを報告している (Gagnon *et al.*, 2009)。

また、代謝性熱産生量の他に、発汗による必要蒸発量 (Evaporate requirement) を統一した熱放散の能力に着目した研究では、高強度の運動における女性の食道温が男性よりも上昇したことを示している (Gagnon & Kenny, 2012b)。これらの研究では、女性で熱ストレスが上昇した理由として、男性に比較して体表面積が小さく (Gagnon *et al.*, 2009)、汗腺が少ないために (Kaciuba-Uscilko & Grucza, 2001)、発汗量が少なく (Gagnon *et al.*, 2013)、熱放散能力が低いことを挙げている。女性の熱放散能力は、発汗よりも皮膚血管拡張による熱放散に依存することが報告されている (Inoue *et al.*, 2005)。発汗による放散能力は、トレーニングによって改善することが広く知られているが、トレーニングによる発汗機能の改善は、男性で女性よりも顕著であることが報告されている (Ichinose-Kuwahara *et al.*, 2010)。発汗に関する感受性では、身体の大きさに関係なく、女性が男性よりも低いことが示されている (Gagnon & Kenny, 2011)。

さらに、高体温を引き起こすような運動からの回復期には、運動後低血圧や血管動態および発汗機能の減衰によって熱放散能力は低下するが (Kenny & Journeay, 2010)、運動後の熱放散能力の減衰は、女性の方で起こりやすいことも示されている (Kenny *et al.*, 2006;

Kenny & Jay, 2007)。そのため、運動後の体温調節機能を回復するためには、女性の方が長い時間を要するといわれている(Kenny & McGinn, 2017)。

2.3.2 身体冷却

身体冷却における性差については、安静時と運動時ともに検討されてきた。寒冷暴露による震えは、女性では男性よりも早い段階（高い体温）で始まり、冷却に対する不快感が大きいことも示されている一方で(Kaikaew *et al.*, 2018)、震えによる熱産生は男性で大きいといわれている(Solianik *et al.*, 2014)。女性は、寒冷環境下において男性よりも不快感を示すことが報告されている(Lan *et al.*, 2008; Karjalainen, 2012)。また、このような外部からの冷却に対して、女性では男性よりも皮膚温の低下が大きく、皮膚温の応答が早いといわれている(Hardy & Du Bois, 1940; Bulbulian *et al.*, 1999; Lan *et al.*, 2008)。Hardy ら（1940）は、寒冷環境下における男女の体温調節について調査し、男性では筋肉量が多いために熱産生が多いことを報告している。

運動後に行った冷水浴では、男性よりも女性で運動誘発性の高体温から早く回復したことから、冷却速度は徐脂肪量に関連していることが報告されている(Lemire *et al.*, 2009)。外部冷却による身体冷却の効果は、体表面積や脂肪量などの身体組成に関連している(Stephens *et al.*, 2018)。そのため、外部冷却では身体組成が異なる男女において、異なる応答を示す可能性が考えられる(Stephens *et al.*, 2017)。運動時の熱ストレスを軽減することを目的とした身体冷却の先行研究では、性差が見られたとする研究(Lemire *et al.*, 2009; Solianik *et al.*, 2015) がある一方で、性差が見られなかったとする研究も存在する(Bulbulian *et al.*, 1999; Morton, 2007; Hosokawa *et al.*, 2017; Lundgren-Kownacki *et al.*, 2017)。これまでの身体冷却に関する先行研究の多くは男性で行われていることから、女性に対するエビデンスについては今後検討を進めることが必要であるとされている(Douzi *et al.*, 2020)。

2.3.4 遅発性筋肉痛

遅発性筋肉痛 (DOMS) は、不慣れな運動や高強度の伸張性運動によって引き起こされ、運動後 24～72 時間に痛みがピークが出現して、運動後 5～7 日で痛みが消失することが報告されている (Cheung *et al.* 2003)。その軽減策として、運動後の冷却が効果的であることが知られている (Hohenauer *et al.*, 2015)。

性差に関する研究において、Dannecker らは、女性は痛みに対する反応が低いと報告している (Dannecker *et al.* 2003)。また、DOMS との関連が提唱されている好中球数 (Neutrophil; NEUT) については、女性で多いことが示されている (MacIntyre *et al.*, 2000)。一方、DOMS や筋肉痛には性差がないとしている先行研究も存在する (Flores *et al.* 2011; Lee *et al.* 2017; Dannecker *et al.* 2012; Nie *et al.* 2007)。また、DOMS を評価する血液指標の代表的な血清クレアチンキナーゼ (CK) 活性が男女で同様に上昇したことも報告されている (Staron *et al.*, 1992; Stupka *et al.*, 2000)。しかし、Flores らは、主観的な筋肉痛には性差はなかったものの、DOMS に関連する関節可動域の低下は女性で大きかったことを示している (Flores *et al.*, 2011)。現段階で、DOMS の原因は明らかになっていないが、その性差についてもさらなる検討が必要であるといえる。

第三章 アイススラリーによるプレクーリングが暑熱環境下における持久性運動時の体温調節機能に与える性差の影響

3.1 緒言

運動時には、男女で異なる生理的応答を示すことが知られている。そのうちの一つとして、体温調節機能が挙げられる。中でも、熱ストレスが大きくなる暑熱環境下における運動では、その差は顕著であり、性周期、身体組成、有酸素能力の違いなどが、その差を生じさせているとされている(Gagnon & Kenny, 2012a)。このような暑熱環境下では、運動中の熱放散の多くは発汗に依存するが、発汗機能は男女で異なることが知られている(Ichinose-Kuwahara *et al.*, 2010; Gagnon & Kenny, 2012b)。女性では、男性に比較して発汗率が低く(Kaciuba-Uscilko & Grucza, 2001)、体表面積が小さいことから(Gagnon *et al.*, 2009)、熱放散能力が低く、運動中の熱ストレスは女性で大きくなることが指摘されている(Gagnon *et al.*, 2009)。そのため、暑熱環境下において運動パフォーマンスを維持するための戦略は、女性にとって特に重要であるといえる。さらに、長時間に亘る持久性運動では、過度な体温の上昇に伴う熱中症の発症が、運動パフォーマンスの低下を引き起こすため、スポーツ現場における暑熱対策は非常に重要となってくる。

暑熱環境下における運動時には、熱中症や運動パフォーマンスの低下を回避する戦略として、冷水の摂取やアイスベストの着用、冷水浴などの身体冷却が頻繁に用いられてきた(Bongers *et al.*, 2017)。実際に、先行研究では、運動前に行う身体冷却（以下プレクーリング）が、暑熱環境下における持久性運動パフォーマンスを改善することが報告されている(Marino, 2002; Quod *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2012)。近年、新たな身体冷却方法としてアイススラリーが注目されている。アイススラリーは、細かな氷の粒と液体が混ざったシャーベット状の飲料であり、同量の水分を摂取させた場合と比較しても効率的に体温を低下させることができるだけでなく、糖質、電解質などを加えることで、栄養補給を同時に行うことができる(Ross *et al.*, 2012; Walker *et al.*, 2014)。また、アイススラリーは、その利便性

からスポーツ現場においても活用することが可能である。これらのことから、暑熱環境下での運動時における過度な体温上昇の抑制や、運動パフォーマンスの低下に対するアイスラリー摂取の有効性が検証されている(Choo *et al.*, 2018)。

しかしながら、これまでに行われてきたアイスラリーを用いた先行研究のほとんどが男性被験者を対象にしており、女性被験者を対象に行った研究は非常に少ない(Zimmermann & Landers 2015; Zimmermann *et al.* 2017a)。男性において運動パフォーマンスの改善が報告されている一方で、女性では運動パフォーマンスが改善されていない。そのため、現段階で女性におけるアイスラリーを用いたプレクーリングの有効性については明らかではない。さらに、先行研究では、アイスラリー摂取時の応答の男女差に身体組成の違いが関連している可能性が指摘されている(Zimmermann & Landers, 2015)。しかし、男女で直接比較した研究は存在しないことから、詳しい原因は分かっていない。プレクーリングに関するレビューにおいても、女性についての知見が不足していることが指摘されている(Jones *et al.*, 2012)。アイスラリーによるプレクーリングの効果について男女で直接比較し、その効果の差について明らかにすることは、熱ストレスが大きく運動時の冷却が重要であると考えられる女性にとっては、適切な身体冷却を行うための有益な知見となり得る。

そこで本研究では、暑熱環境下におけるアイスラリーによるプレクーリングが運動継続時間および体温調節応答に与える影響について、男女で比較することでその効果の違いを検討することとした。

3.2 方法

被験者

被験者は20～29歳の健康な男女24名（男性12名、女性12名）であった。身体的特徴を表3-1に示した。被験者は、実験期間中の生活習慣に変化がなく、暑熱順化していない者

とした。また、女性被験者は正常な月経周期（25～38日）を有し、かつ経口避妊薬を服用していない者であった。事前のスクリーニングで、熱中症の既往歴などがあり、安全な運動の実施が困難であると判断された者や、運動習慣および生活習慣が著しく変動する可能性のある者は除外した。なお、本研究は早稲田大学の人を対象とする倫理審査委員会の承認を得た後に（承認番号 2019-176）、被験者の同意を得たうえで行った。

Table 3-1. Characteristics of the subjects

	Male	Female
Age (yr)	25.2 ± 1.7	22.4 ± 1.5
Height (cm)	170.6 ± 5.5*	158.9 ± 5.6
Weight (kg)	65.8 ± 10.3	58.2 ± 10.0
BMI (kg/m ²)	22.5 ± 2.7	23.0 ± 3.1
%Body fat (%)	17.5 ± 5.2	28.4 ± 4.3*
Fat free mass (kg)	54.0 ± 7.2*	41.6 ± 6.9
Fat mass (kg)	11.8 ± 4.4	16.6 ± 4.4*
Muscle mass (kg)	30.5 ± 4.2*	22.7 ± 4.1
Body surface area (m ²)	1.8 ± 0.2*	1.6 ± 0.1
BSA:M (m ² /kg)	0.027 ± 0.002	0.028 ± 0.002
VO _{2 max} (mL/kg/min)	43.6 ± 3.3*	36.5 ± 4.2

BMI, body mass index; BSA, body surface area; BSA:M, body surface area to mass ratio;

*Significantly different between sexes

最大酸素摂取量の測定

最大酸素摂取量 (Maximal oxygen uptake: $VO_2\max$) を測定する前に、身長計を用いて身長を測定するとともに、体組成計 (InBody 720, InBody Japan 社製) により身体組成を測定した。その後、本実験の運動強度を決定するために、 $VO_2\max$ の測定を、温度 22°C 、湿度 50%の人工気候室にて行った。運動は、自転車エルゴメータ (POWERMAX-VII、コンビ社) にて、20 W で 2 分間のウォーミングアップを行った後に、男性では 80 W、女性では 40 W の負荷から開始し、2 分おきに 20 W ずつ負荷を漸増させることで疲労困憊まで至らしめた。運動中の呼気は呼気ガス分析器 (AE-300S、ミナト医科学株式会社) を用いて、Expire 法にて採取し、酸素摂取量 (Oxygen uptake: VO_2)、および呼吸交換比 (Respiratory exchange ratio : RER) を求めた。また、運動の負荷を増大させる 20 秒前には、主観的運動強度 (Rating of perceived exertion: RPE) を聴取するとともに、心拍数を心電計 (BSM-2401, 日本光電社製) にて測定した。 $VO_2\max$ の判定は、 VO_2 のレベリングオフが観察されることとし、これが認められない場合は、RER が 1.10 以上、心拍数が予想最高心拍数の 95%以上、RPE が 18 以上という 3 項目のうちのいずれか 2 項目を満たした場合とした。

実験プロトコル

本実験では、糖質および電解質を含んだアイスラリーを摂取するアイスラリー試行 (ICE 試行) と、同組成の常温スポーツ飲料を摂取するコントロール試行 (CON 試行) の 2 試行を無作為化交差試験にて行った。各試行において実験前の食事内容と、実験日の運動着を統一させた。実験の当日は、実験室への来室までに 500 mL の水を飲むこと、来室前の 2 時間は水以外の飲食は禁止であることを事前 ($VO_2\max$) 測定時に口頭にて指示した。また、日内変動の影響を除外するために、実験は全て 13 時から 16 時の間に開始した。加えて、女性被験者内における安静時体温の月内変動の影響を排除するために、質問紙の回答から月経周期を予測し、排卵後の黄体期に統一したうえで実験を行った。

被験者は実験室に来室後、下着のみを着用した状態で体重計（WB-150、TANITA）により体重を測定した。その後、被験者自身が保存容器を用いて採尿を行うとともに、医療用潤滑ゼリー（リューブゼリー、ジェクス株式会社）を塗った直腸温測定用プローブ（401J、日機装サーモ社）を自ら直腸内に 10～12 cm 挿入した。また、皮膚温の測定に用いるボタン型温度データロガー（サーモクロン SL, KN ラボラトリーズ）を上腕部、胸部、大腿部および下腿部に貼付するとともに、双極誘導法による心電図記録のために、心電図用電極を三箇所貼付した。

その後、温度 38°C、湿度 40%の人工気候室へ入室させ、前腕および背中に発汗計（POS-02、スキノス社）のプローブを装着し、すべての準備が整い次第、10 分間の座位安静を保たせた。10 分間の座位安静後、スポーツ飲料（ポカリスエット、大塚製薬）を用いて作製したアイスラリー（-1°C）または同組成の常温スポーツ飲料（20°C）のいずれかを体重 1 kg あたり 1.25 g ずつ、5 分おきに計 6 回摂取させた。最後の飲料摂取から 10 分間が経過した時点で、被験者に呼気ガスマスクを装着し、55%VO₂max 強度での自転車エルゴメータ運動を開始させた。運動は、直腸温が 38.5°C に達するか、被験者が疲労困憊に至るまで継続させた。運動終了後には、再度体重の測定と採尿を行った。

なお、直腸温、皮膚温、局所発汗量および心拍数は実験開始から終了まで、VO₂ および RER は運動開始から終了まで連続測定した。

測定項目

事前測定時には、身体組成として、体重、Body Mass Index (以下 BMI)、体脂肪率、除脂肪量、脂肪量および骨格筋量を測定した。また、身長および体重の測定結果から体表面積および体表面積当たりの体重を算出した。

本測定時に測定した直腸温は、絶対値のほか安静時からの変化量を算出した。4 点（上腕部、胸部、大腿部および下腿部）の皮膚温の結果から、Ramanathan の 4 点法を用いて

平均皮膚温を算出した(Ramanathan, 1964)。また、先行研究と同様の方法により、直腸温と平均皮膚温から平均体温を算出した(Morris *et al.*, 2016)。運動時における1分間当たりの直腸温の上昇を体温上昇速度として評価した。

温熱感および熱快適感は、実験開始から終了まで、RPEは運動開始から終了まで5分おきに測定した。温熱感は1を「とても寒い」、4を「普通」、7を「非常に暑い」として7段階で、熱快適感は1を「非常に快適」、4を「非常に不快」として4段階で評価した(Gagge *et al.*, 1967)。

全身発汗量は、運動前後の体重および飲水量から算出した(Niwa *et al.*, 1996)。運動時における発汗開始時間を前腕および背中中の局所発汗量のデータから算出し、また、その時点での直腸温を求めた。

本測定時に採取した呼気ガスから、 VO_2 、RERを算出し、それらの結果から代謝性熱産生量を算出した(Jay *et al.*, 2011)。

運動パフォーマンスは、運動開始から運動終了時までの時間を運動継続時間として評価した。

統計処理

測定結果は全て平均値±標準偏差で示した。条件間の差は、対応のあるt検定を用い、性差による差は、対応のないt検定を用いて検証した。時系列による影響と試行間の影響を検証するために(時間×試行)対応のある二元配置分散分析を用い、性差の影響を検証するために(時間×性差)対応のない二元配置分散分析を用いた。体温関連指標(直腸温、直腸温変化量、皮膚温、平均体温)については、運動開始35分までを二元配置の分散分析を用いて行い、運動終了地点についてはそれぞれt検定を行った。統計処理は、SPSS (SPSS ver.26 for windows)を用いて行い、有意水準は5%未満とした。

3.3 結果

被験者特性および安静時データ

身長、除脂肪量、筋肉量、体表面積および $VO_2\max$ は女性に比較して男性で有意に高く、体脂肪率および脂肪量は男性に比較して女性で有意に高かった（表 3-1）。

脱水状況を調べるために測定した尿比重には、男女間および試行間において有意な差は見られなかった（Male vs Female, ICE, 1.014 ± 0.008 vs 1.012 ± 0.008 ; CON, 1.014 ± 0.008 vs 1.016 ± 0.010 ）。

安静時の直腸温（Male vs Female, ICE, 37.2 ± 0.23 vs 37.3 ± 0.31 ; CON, 37.2 ± 0.28 vs $37.3 \pm 0.17^\circ\text{C}$ ）、平均血圧（Male vs Female, ICE, 87.5 ± 6.05 vs 90.4 ± 7.07 ; CON, 87.4 ± 5.29 vs 83.6 ± 9.61 mmHg）および心拍数（Male vs Female, ICE, 74.5 ± 18.1 vs 74.2 ± 15.5 ; CON, 75.7 ± 13.8 vs 75.4 ± 15.7 bpm）にも、男女間および試行間において差はみられなかった。

体温関連指標

直腸温については、時間と性差による検定では、ICE 試行と CON 試行の両試行間に交互作用および性差による主効果はみられず、時間による主効果のみ見られた（ICE, $p < 0.0001$; CON, $p < 0.0001$ ）。また、時間と試行による検定では、男性および女性の両方に ICE 試行と CON 試行との間に交互作用がみられた（Male, $p < 0.0001$; Female, $p < 0.0001$ ）。男性では-20分（運動 20 分前）時点から 0 分時点まで CON 試行に比較して ICE 試行で有意に低く（ $p < 0.05$ ）、女性では-10分（運動 10 分前）時点から 0 分時点まで CON 試行に比較して ICE 試行で低かった（ $p < 0.05$ ）（Figure 3-1 (a)）。

直腸温の変化量においても、時間と性差による検定および時間と試行による検定では、直腸温と同様の結果が得られ、男性および女性の両方に ICE 試行と CON 試行との間に交互作用がみられた（Male, $p < 0.0001$; Female, $p < 0.0001$ ）。男性では-35分（運動 35 分前）

時点から 10 分（運動 10 分前）時点まで、女性では -20 分（運動 20 分前）時点から 10 分（運動 10 分前）時点まで、CON 試行に比較して ICE 試行で低かった ($p<0.05$)。

皮膚温については、時間と性差による検定では、ICE 試行と CON 試行の両方に交互作用および性差による主効果はみられず、時間による主効果のみが見られた (ICE, $p<0.0001$; CON, $p<0.0001$)。また、時間と試行による検定では、男性においてのみ交互作用がみられたが ($p=0.035$)、その後の下位検定では有意な差は認められなかった。女性では、交互作用および時間による主効果はみられず、試行の主効果のみが見られた ($p<0.0001$) (Figure 3-1 (b))。

平均体温については、時間と性差による検定では、ICE 試行と CON 試行の両方に交互作用および性差による主効果はみられず、時間による主効果のみが見られた (ICE, $p<0.0001$; CON, $p<0.0001$)。また、時間と試行による検定では、男性および女性の両方で ICE 試行と CON 試行との間に交互作用がみられた (Male, $p<0.0001$; Female, $p<0.0001$)。男性では、-20 分（運動 20 分前）時点から 15 分時点まで、女性では 5 分時点でのみ CON 試行に比較して ICE 試行で低かった ($p<0.05$) (Figure 3-1 (c))。

運動終了時点の値を比較すると、皮膚温においては、ICE 試行と CON 試行の両方で、男女間に有意な差がみられた (Male vs Female, ICE, $p=0.001$; CON, $p=0.030$)。また、男性のみ試行間に有意な差がみられた (ICE vs CON; Male, $p=0.008$) (ICE, Male, 38.0 ± 0.30 , Female, 37.4 ± 0.45 ; CON, Male, 37.8 ± 0.19 , Female, $37.4\pm 0.57^{\circ}\text{C}$) (Figure 3-1 (a-c))。

直腸温の低下量については、ICE 試行と CON 試行の両試行で男女間に有意な差は見られなかった。一方で、男女ともに試行間に有意な差がみられ CON 試行に比較して ICE 試行で有意に低かった (Male, $p<0.0001$; Female, $p=0.001$)。運動時の体温上昇速度は、ICE 試行においてのみ男女間で有意な差がみられ、女性に比較して男性で有意に速かった ($p=0.027$) (Table 3-2)。

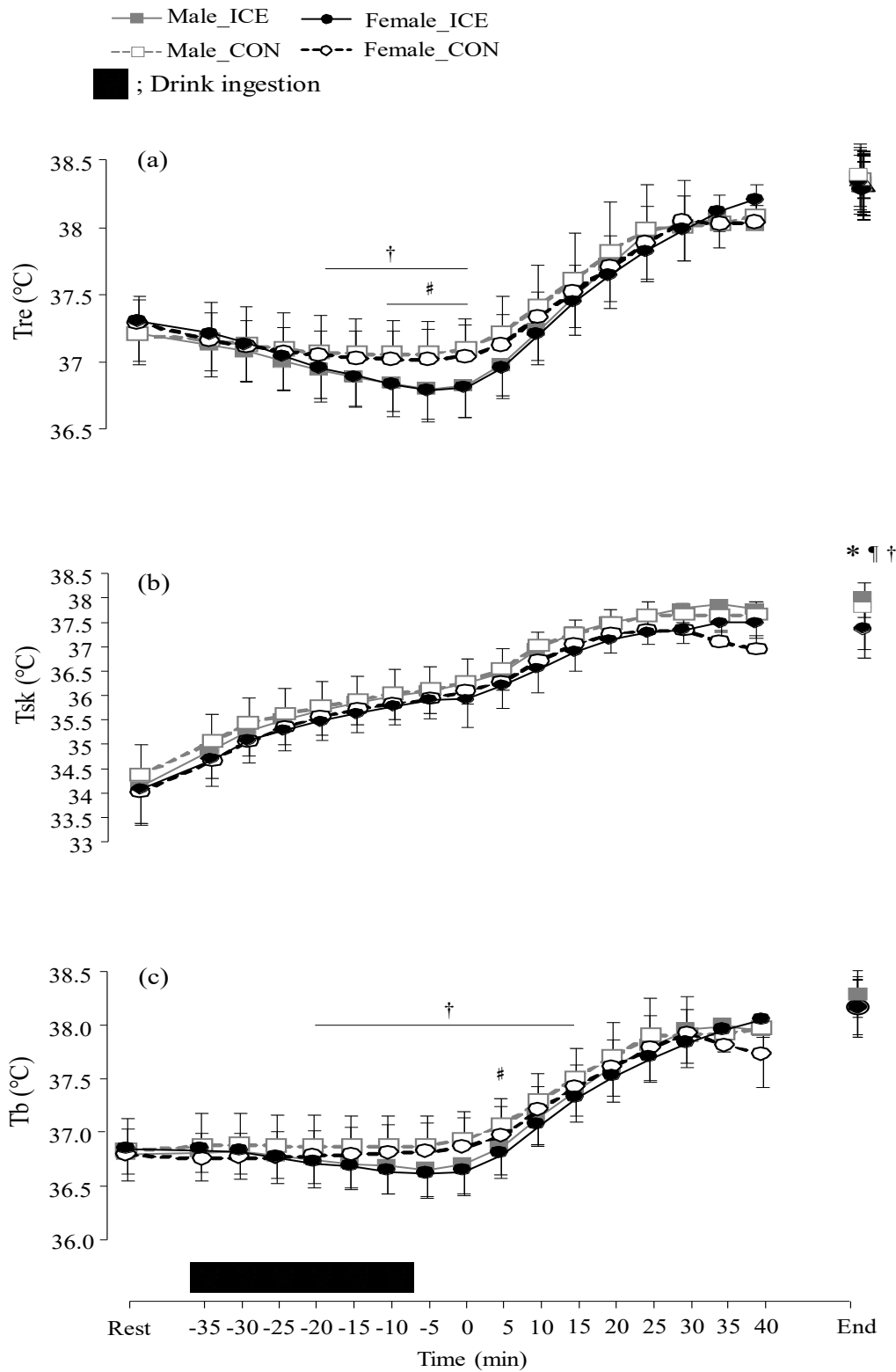


Figure 3-1. Thermoregulatory responses during experiments.

T_{re} , rectal temperature; ΔT_{re} , changes value of rectal temperature from rest; T_{sk} , mean skin temperature; T_b , mean body temperature; *Significantly different between sexes in ICE; †Significantly different between sexes in CON; †Significantly different between trials in males; #Significantly different between trials in females ($p < 0.05$).

代謝性熱産生量

運動中の代謝性熱産生量については、試行間では男女ともに差は見られなかったが、両試行においては男女間で有意な差が見られ、女性に比較して男性で有意に高い値を示した (Male vs Female, ICE, $p=0.007$; CON, $p=0.012$) (Table3-2)。

発汗

全身発汗量については、男女間と試行間に有意な差は見られなかった。発汗開始時間については、両試行において前腕および背中両方で男女間に有意な差は見られなかった。一方、男性の背中 ($p=0.020$)、女性の前腕 ($p=0.002$) および背中 ($p=0.018$) の発汗開始時間には試行間で有意な差がみられた。いずれも、CON 試行に比較して ICE 試行において有意に遅かった。発汗開始閾値については、男女間で有意な差は見られなかった。男性においてのみ有意な差がみられ、CON 試行に比較して ICE 試行において前腕 ($p=0.002$) および背中 ($p=0.018$) の両方で有意に低かった (Table 3-2)。

心拍数

心拍数については、時間と性差による検定では、ICE 試行と CON 試行の両試行に交互作用および性差による主効果はみられず、時間による主効果のみが見られた (ICE, $p<0.0001$; CON, $p<0.0001$)。また、試行と時間による検定でも同様に、男女ともに交互作用と試行による主効果は見られず、時間による主効果のみが見られた (Male, $p<0.0001$; Female, $p<0.0001$)。

Table 3-2. Physiological measures for ice slurry (ICE) and control water (CON) interventions

		Male				Female			
		ICE		CON		ICE		CON	
Exercise time (min)		35.2 ± 5.9	33.8 ± 8.1	42.3 ± 7.0 *	42.3 ± 10.4 ¶				
Tre-cool (°C)		-0.41 ± 0.17 †	-0.15 ± 0.17	-0.51 ± 0.23 #	-0.27 ± 0.23				
ΔTre/time (°C / min)		0.045 ± 0.008 *	0.041 ± 0.011	0.036 ± 0.010	0.033 ± 0.009				
Mean M (kJ)		474.7 ± 83.8 *	453.0 ± 86.4 ¶	368.8 ± 63.7	357.9 ± 54.6				
WBSL (g)		520.9 ± 147.6	567.5 ± 272.6	652.9 ± 251.6	680.4 ± 347.3				
Sweating onset time (sec)	Forearm	96.7 ± 92.7	83.0 ± 104.8	167.3 ± 114.6 #	34.5 ± 45.5				
	Back	81.7 ± 72.2 †	49.0 ± 81.7	109.1 ± 94.8 #	22.7 ± 50.6				
Sweating onset Tre (°C)	Forearm	36.92 ± 0.30	37.13 ± 0.25 †	36.88 ± 0.23	37.06 ± 0.24				
	Back	36.91 ± 0.30	37.12 ± 0.25 †	36.86 ± 0.22	37.05 ± 0.23				

Tre-cool, the magnitudes of decreasing rectal temperature during drinking; ΔTre/time, the rate of increasing rectal temperature during exercise; Mean M, mean metabolic heat production during exercise; WBSL, whole body sweat loss; *Significantly different between sexes in ICE; ¶Significantly different between sexes in CON; †Significantly different between trials in males; #Significantly different between trials in females (p < 0.05).

主観的指標

温熱感については、性差による検定では、ICE 試行と CON 試行の両試行に交互作用はみられなかった。ICE 試行においては性差による主効果はみられず、時間による主効果のみが見られた ($p<0.0001$)。CON 試行においては、時間による主効果 ($p<0.0001$) および性差による主効果 ($p=0.043$) がみられた。試行による検定では、男女ともに交互作用がみられた (Figure 3-2 (a))。

熱快適感については、時間と性差による検定において交互作用がみられた。5分時点および20分時点から40分時点まで、男性に比較して女性で有意に低かった ($p<0.05$)。試行による検定では、男性でのみ交互作用がみられ、-35分(運動35分前)時点から5分時点まで CON 試行に比較して ICE 試行で有意に低かった。一方、女性では交互作用は見られず、時間による主効果 ($p<0.0001$) および試行による主効果 ($p=0.0002$) がみられた (Figure 3-2 (b))。

運動中の RPE については、ICE 試行でのみ交互作用がみられた。10分時点から40分時点まで男性に比較して女性で有意に低かった。CON 試行では、時間による主効果のみが見られた ($p<0.0001$)。試行による検定では、男女ともに交互作用および試行による主効果は見られず、時間による主効果のみが見られた (Male, $p<0.0001$; Female, $p<0.0001$)。

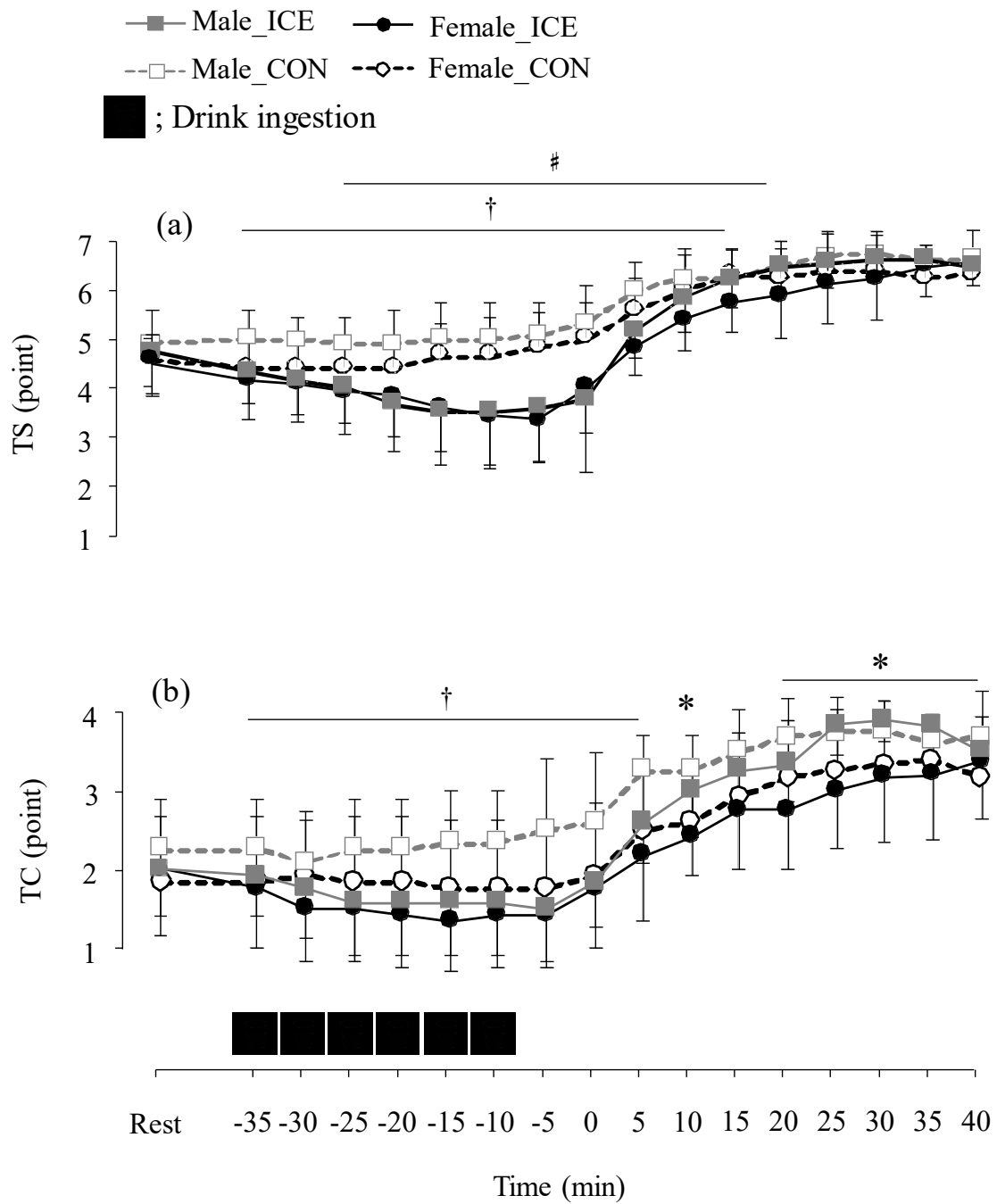


Figure 3-2. Thermal sensation and thermal comfort during experiments.

TS, thermal sensation; TC, thermal comfort

*Significantly different between sexes in ICE; †Significantly different between

trials in males; #Significantly different between trials in females ($p < 0.05$).

運動継続時間

運動継続時間については、男女とも試行間に有意な差は見られなかった (Table 3-2) 。一方で、ICE 試行および CON 試行の両試行において、女性では男性に比較して有意に長かった (Male vs Female, ICE, $p=0.013$; CON, $p=0.036$) 。また、運動強度は両試行間および男女間に有意な差は見られなかった (Male vs Female, ICE, 57.8 ± 8.8 vs 59.8 ± 4.2 ; CON, 56.6 ± 10.0 vs 59.4 ± 5.1 %VO₂max) 。さらに、CON 試行に対する ICE 試行における運動パフォーマンスの改善率には男女間で差は見られなかった (Figure 3-3) 。

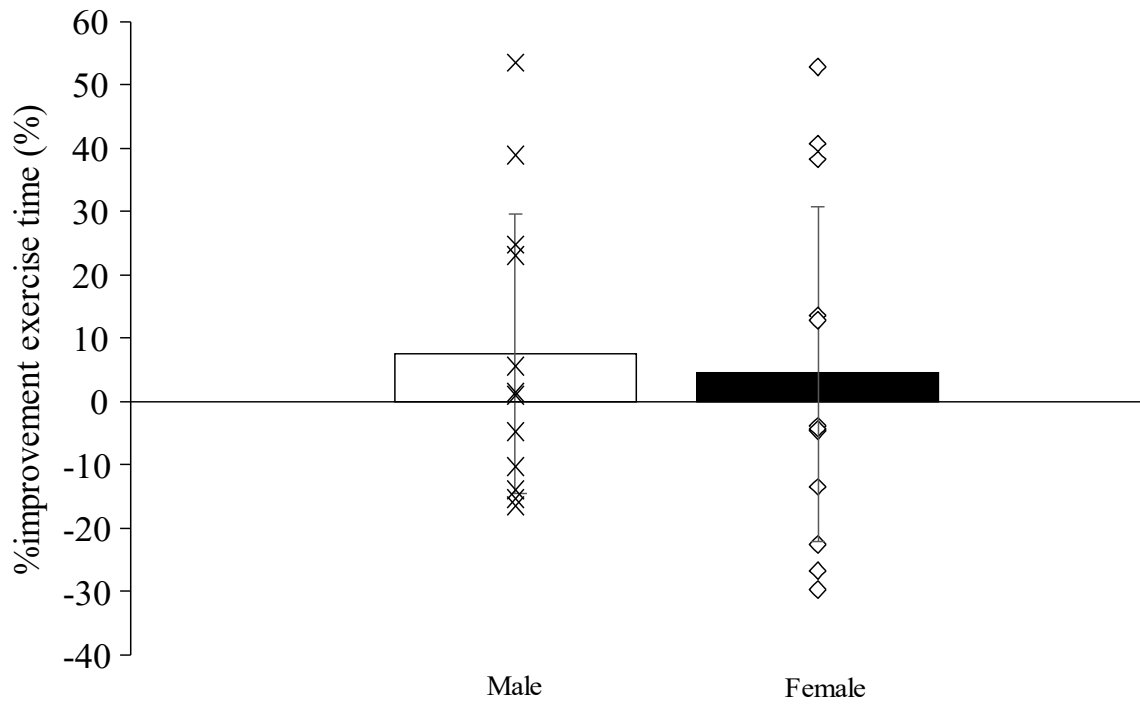


Figure 3-3. %Improvement exercise time (sec).

× Individual data in males (n = 12); ◇ Individual data in females (n = 12).

3.4 考察

本研究は、プレクーリング後の持久性運動におけるアイススラリーの冷却効果を男女で比較した初めての研究である。その結果、温度 38°C、湿度 40%RH の環境下において、55%VO₂max で運動を行わせた場合に、運動継続時間は男性に比較して女性で有意に長かったことを示した。しかし、アイススラリー摂取による運動継続時間の改善は男女ともに見られなかった。一方、熱快適感、RPE、代謝性熱産生量および体温上昇速度には男女差が見られ、代謝性熱産生量の両試行における男女差は、運動継続時間の男女差に影響していた可能性が示唆された。

運動パフォーマンスの改善率には男女間で差は見られなかったが、個人差が大きいことを示した (Figure 3-3)。直腸温、直腸温の変化量、平均皮膚温および平均体温には、両試行ともに男女差は見られなかった。先行研究では、男女の身体組成の違いが、アイススラリーの冷却応答の違いに関連する可能性が指摘されている (Zimmermann & Landers, 2015)。しかし、本研究では身体組成に違いが見られたものの、体温の低下量 (Tre-cool) には、男女間で差が見られなかった。そのため、男女間の身体組成の違いを、アイススラリーによるプレクーリング時には、考慮する必要がないことを示している。

本研究では、相対強度での持久性運動におけるアイススラリーによるプレクーリングの効果を男女で比較したが、体温調節機能においては男女間で明確な差は見られなかったといえる。女性を対象とした一編の先行研究では、アイススラリーによるプレクーリング後の持久性運動としてタイムトライアルを用いていたが、より詳細にアイススラリーによるプレクーリングの効果を生理的な側面から検討するためには、運動の相対強度をそろえる必要があると考えられた。しかし、相対強度をそろえた場合でも女性ではアイススラリーによる運動継続時間 (持久性運動パフォーマンス) への効果は見られなかった。

先行研究によると、プレクーリングの主な効果は、運動開始時の深部体温を低下させることによるものであり、運動開始時の体温の低さが運動継続時間に直結することを明らかに

している(González-Alonso *et al.*, 1999)。しかしながら、本研究では運動開始時の体温が ICE 試行の方で有意に低かったにも拘らず、運動継続時間は男女ともに改善されなかった。運動中の体温上昇速度は、男女ともにわずかに ICE 試行の方で速く、このことによって結果が相殺された可能性が考えられる。アイススラリーに関するレビューでも、アイススラリー摂取後にコントロール水と比較して体温上昇速度が増加することが指摘されており、本研究では男女ともにその影響を受けたものと考えられる(Jay & Morris, 2018)。

一方で、主観的なパラメータには男女差が見られた。温熱感や熱快適感については、ICE 試行において運動の後半に男女間で有意な差が見られ、女性では男性よりも低い値を示しており、男性において不快感が大きかった。先行研究では、男女で温熱感や熱快適感が異なることが報告されている(Lan *et al.*, 2008; Karjalainen, 2012; Wang *et al.*, 2018)。これまでのレビューにおいて、寒冷環境下や温熱環境下における温熱感や熱快適感では、女性の方で不快感が大きくなり易いことが示されている(Karjalainen, 2012; Wang *et al.*, 2018)。一方で、Wang らは心拍変動から分析した場合に、女性では常温および寒冷環境下において不快感が増加し易くなり、男性では温熱環境下において不快感が増加し易いことを示している。本研究における熱快適感の性差は Wang らの先行研究を支持する結果となった。

RPE は、男女ともに試行間で差は見られなかったが、運動開始 10 分後から運動終了時まで、ICE 試行において女性に比較して男性で高い値を示した。ICE 試行でのみ男女差がみられたことから、アイススラリーによって、女性では男性よりも疲労感を軽減できる可能性が示唆された。先行研究では、暑熱環境下では女性と比較して男性において疲労感が大きいことが報告されているが(Beshir & Ramsey, 1981)、本研究ではその性差は ICE 試行においてのみ確認された。

身体冷却による主な効果は、体温を低下させることであるといわれており、近年では、温熱感や熱快適感などの改善が運動パフォーマンスの改善に関与することが報告されている

(Siegel *et al.*, 2011; Stevens *et al.*, 2018)。そのため、ICE 試行においては、女性における熱快適感や RPE の増大が抑制される可能性も考えられ、男性よりも運動パフォーマンスの改善につながることも期待される。

これまで、女性の熱ストレスが大きくなる原因として、発汗量の少なさによる熱放散能力の低さが挙げられていた(Zimmermann *et al.* 2017b; Gagnon *et al.* 2009)。しかしながら、本研究では全身発汗量、発汗開始時間および発汗閾値に有意な男女差は認められなかった。体温関連指標においても男女差がみられなかったことから、男女間で熱ストレスは変化しなかったことが考えられる。実際に、先行研究において男女で熱ストレスが異なることを報告しているものでは、代謝性熱産生量を統一している(Gagnon *et al.*, 2009; Gagnon & Kenny, 2012b)。本研究では、相対強度 (55%VO₂max) において代謝性熱産生量が女性と比較して男性で低かったことから、熱ストレスが一定ではなかったといえる。そのため、本研究では同一の熱ストレス下での発汗量については比較できなかったものの、同一相対強度の運動では発汗量に差がみられないことを示すものである。

運動継続時間は、両試行において男性に比較して女性で有意に長かったが、男女ともに試行間で差は見られず、運動継続時間に対するアイスラリーの効果は見られなかった。女性の運動継続時間が有意に長かった理由としては、代謝性熱産生量が男女で異なったことが挙げられる。本研究の結果から、相対的に同一強度で運動を行わせた場合、代謝性熱産生は男性の方で大きくなり、その結果、運動継続時間が短くなったものと思われる。また、理由のもう一つの可能性は、体温上昇速度が男性において速かったことである。これは代謝性熱産生とも関連していると考えられるが、ICE 試行においては男性で有意に速く、CON 試行でも有意傾向がみられた。

これらの結果から、運動継続時間に関連する熱ストレスの男女差は、ICE 試行において特に顕著であった可能性が示された。先行研究では、冷水浴を行った場合に、女性と比較して男性で代謝性熱産生が大きくなることが報告されている(Solianik *et al.*, 2014)。本研究で

は、運動時においてもその影響が続いていた可能性が考えられる。また、発汗機能に差が見られなかったことから、相対強度での持久性運動では、熱放散量よりも代謝性熱産生量が運動時間に関与している可能性が示唆される。

本研究では、アイススラリーによるプレクーリングは男女ともに運動継続時間を改善しなかったが、代謝性熱産生量をそろえた運動や、異なる環境下（多湿環境など）においてさらなる検討が必要であると考えられる。一方で、同一相対強度にも拘らず主観的な指標に男女で差が示されたことから、女性における主観的な指標がパフォーマンスに大きく関与するスプリント運動などでの検討を進めることも重要である。さらに、本研究を含めたアイススラリーによるプレクーリングの研究では、女性において効果が立証されていないことから、女性ではプレクーリングではなく運動中に行うミッドクーリング（パーククーリング）などの有効性を併せて検討していくことも必要であると考えられる。

本研究の結果から、同一相対強度の持久性運動ではアイススラリーによる効果は見られなかったが、代謝性熱産生量の違いによって男性では女性よりも運動時間が短くなったことが示された。また、同一相対強度での運動における発汗については、男女間で差がみられなかったものの、運動による不快感および疲労感は男性で大きかったことから、冷却によるこれらへの抑制効果は女性において大きい可能性が示唆された。

第四章 持久性運動後のアイススラリー摂取が体温調節機能に与える性差の影響

4.1 緒言

暑熱環境下における運動時には、過度な体温上昇によって、熱中症や運動パフォーマンスの低下を引き起こす。運動によって引き起こされる高体温による熱中症の重症化リスクは、体温の高さとその持続時間に依存するため、30分以内に危険体温から速やかに体温を低下させることが重要である(Casa *et al.*, 2015)。そのため、スポーツ現場における身体冷却による熱中症の予防策は、様々な方法で検討されてきた。なかでも、女性では男性よりも熱中症のリスクが大きいといわれている(Druyan *et al.*, 2012; Kazman *et al.*, 2015; Hackney, 2017)。また、高体温を引き起こすような運動からの回復期には運動後低血圧や、血管動態および発汗機能の減衰によって、熱放散能力が低下するが(Kenny & Journeay, 2010)、これらの減衰は、女性の方で起こりやすいことも示されている(Kenny & Jay, 2007)。これらのことから、運動後の体温低下のための身体冷却は女性にとって特に重要であるといえる。

近年、アイススラリーによる身体冷却が注目されているが、運動前に行うプレクーリングの有効性については多く検証されている。一方で、運動後に行うポストクーリングでは、その後の運動パフォーマンスに改善が見られなかったことから、その効果は小さいと報告されている(Stanley *et al.*, 2010; Jay & Morris, 2018)。アイススラリーは、細かな氷の粒と液体が混ざったシャーベット状の飲料であり、同量の水分を摂取させた場合と比較しても効率的に体温を低下させることができるだけでなく、糖質、電解質などを加えることで、栄養補給を同時に行うことができる(Ross *et al.*, 2012; Walker *et al.*, 2014)。また、アイススラリーは、その利便性からスポーツ現場においても活用することが可能である。これらのことから、暑熱環境下での運動時における過度な体温上昇の抑制や、運動パフォーマンスの低下に対するアイススラリー摂取の有効性が検証されている(Choo *et al.*, 2018)。

しかしながら、これまでに行われてきたアイススラリーを用いた先行研究のほとんどが男性被験者を対象にしており、女性被験者を対象に行った研究は非常に少ない

(Zimmermann & Landers 2015; Zimmermann *et al.* 2017b)。男性においては運動パフォーマンスの改善が報告されている一方で、女性では運動パフォーマンスに改善がみられていない。そのため、現段階では女性におけるアイススラリーを用いた身体冷却の有効性については明らかではないといえる。我々が行った研究でも同様に（研究1）、女性における運動パフォーマンスの改善は見られなかった。そのため、女性におけるアイススラリーを用いた身体冷却の方法については、プレクーリング以外の方法を検討する必要があると考えられた。

女性を対象にして、運動後にアイススラリーを用いた研究は未だなされていない。そのため、アイススラリーによるポストクーリングの有効性を明らかにすることは、運動後の熱放散能力が低下する女性にとっては、身体冷却最適化のための重要な知見となることが考えられる。さらに、男女で同条件の運動および冷却を行わせて比較することで、女性の特徴を明らかにし、男性とは異なるクーリングプロトコルを立証するための手がかりになるとも考えられる。そこで本研究では、アイススラリーによる運動後の内部冷却の効果について男女で比較することとした。

4.2 方法

第三章における研究課題1と同じ被験者、最大酸素摂取量および測定項目を用いた。

実験プロトコル

本実験では、糖質および電解質を含んだアイススラリーを摂取するアイススラリー試行（ICE 試行）と、同組成の常温スポーツ飲料を摂取するコントロール試行（CON 試行）の2試行を無作為化交差試験にて行った。各試行において実験前の食事内容と、実験日の運動着を統一させた。実験の当日は、実験室への来室までに500 mLの水を飲むこと、来室前の2時間は水以外の飲食は禁止であることを事前（VO₂max）測定時に口頭にて指示した。ま

た、日内変動の影響を除外するために、実験は全て 13 時から 16 時の間に開始した。加えて、女性被験者内における安静時体温の月内変動の影響を排除するために、質問紙の回答から月経周期を予測し、排卵後の黄体期に統一したうえで実験を行った。

被験者は実験室に来室後、下着のみを着用した状態で体重計 (WB-150、TANITA) により体重を測定した。その後、被験者自身が保存容器を用いて採尿を行うとともに、医療用潤滑ゼリー (リューブゼリー、ジェクス株式会社) を塗った直腸温測定用プローブ (401J、日機装サーモ社) を自ら直腸内に 10~12 cm 挿入した。また、皮膚温の測定に用いるボタン型温度データロガー (サーモクロン SL, KN ラボラトリーズ) を上腕部、胸部、大腿部および下腿部に貼付するとともに、双極誘導法による心電図記録のために、心電図用電極を三箇所貼付した。

その後、温度 38°C・湿度 40%の人工気候室へ入室させ、前腕および背中に発汗計 (POS-02、スキノス社) のプローブを装着し、すべての準備が整い次第、10 分間の座位安静を保たせた。10 分間の座位安静後、被験者に呼気ガスマスクを装着し、55%VO₂max 強度での自転車エルゴメータ運動を開始させた。運動は、直腸温が 38.5°C に達するか、被験者が疲労困憊に至るまで継続させた。

運動終了後に、再度体重の測定と採尿を行い、着替えをさせた後、ポストクーリングの影響をみるためにスポーツ飲料 (ポカリスウェット、大塚製薬) を用いて作製したアイスラリー (-1°C) または同組成の常温スポーツ飲料 (20°C) のいずれかを体重 1 kg あたり 5 g を 1 回、10 分後および 15 分後にさらに 1.25 g ずつ計 3 回摂取させ、冷却開始から 60 分間の座位安静を保たせた。

運動後の回復期には、直腸温、皮膚温、心拍数、血圧、温熱感および熱快適感を 5 分おきに測定した。

測定結果は全て平均値±標準偏差で示した。条件間の差は、対応のある t 検定を用い、性差による差は、対応のない t 検定を用いて検証した。時系列による影響と試行間の影響（時間×試行）を検証するために対応のある二元配置分散分析を用いた。統計処理は、SPSS（SPSS ver.26 for windows）を用いて行い、有意水準は 5%未満とした。

4.3 結果

被験者特性および安静時脱水状況

被験者の身体的特徴は表 3-1 に示されている。身長($p < 0.0001$)、除脂肪量($p < 0.0001$)、筋肉量($p < 0.0001$)、体表面積($p = 0.020$) および $VO_2\max$ ($p < 0.0001$)は女性に比較して男性で有意に高く、体脂肪率($p < 0.0001$) および脂肪量は男性に比較して女性で有意に高かった($p < 0.0001$)。

脱水状況を調べるために測定した尿比重には、男女間および試行間において有意な差は見られなかった (Male vs Female, ICE, 1.013 ± 0.007 vs 1.013 ± 0.007 ; CON, 1.014 ± 0.009 vs 1.015 ± 0.008)。

体温関連指標

直腸温は、回復期を通して ICE 試行において男性では女性よりも高い値を示した。また、女性においてのみ ICE 試行において CON 試行に比較して低い値を示した。回復期の体温低下量は、両試行とも男女間で差はなかったが (Male vs Female, ICE, $-0.89 \pm 0.08^\circ\text{C}$ vs $-0.97 \pm 0.21^\circ\text{C}$; CON, $-0.87 \pm 0.28^\circ\text{C}$ vs $-0.76 \pm 0.25^\circ\text{C}$)、女性においてのみ、ICE 試行において CON 試行と比較して小さな値を示した ($p = 0.011$) (Figure 4-1)。

皮膚温は、両試行において男性では女性よりも運動終了時点から回復期 30 分まで高い値を示した。また、女性においてのみ、ICE 試行において CON 試行に比較して低い値を示す時間帯がみられた (Table 4-1)。

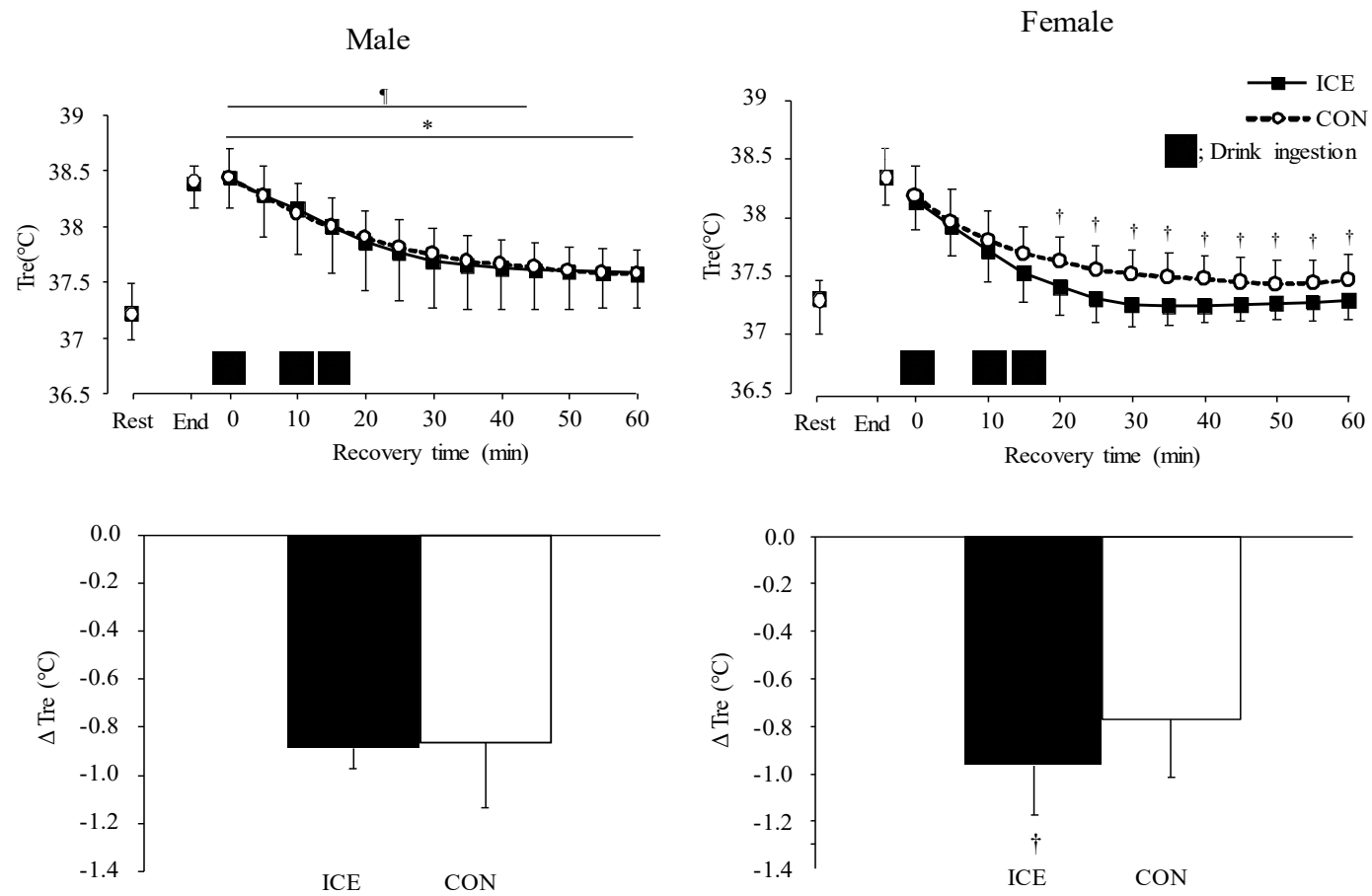


Figure 4-1. Rectal temperature (T_{re}) during experiment and changes rectal temperature (ΔT_{re}) from starting recovery.

*Significantly different between sexes in ICE; ¶ Significantly different between sexes in CON; †Significantly different between trials

Table 4-1. Mean skin temperature (Tsk), Mean arterial pressure (MAP) and Heart rate (HR)

		Rest	E-End	Post 0 min	10 min	20 min	30min	40 min	50min	60min
<u>Tsk</u>										
M	ICE	34.4 (0.6)	37.9 (0.3)*	36.1 (0.7)*	36.7 (0.5)*	36.5 (0.5)*	36.5 (0.5)*	36.5 (0.5)	36.5 (0.5)	36.6 (0.6)
	CON	34.1 (0.7)	37.9 (0.2)*	35.7 (0.7)	36.6 (0.5)*	36.6 (0.4)*	36.5 (0.4)*	36.4 (0.5)	36.4 (0.6)	36.4 (0.6)
F	ICE	34.1 (0.8)	37.5 (0.4)	34.7 (0.9)	35.6 (0.7)	35.7 (0.7)	35.8 (0.8)	36.1 (0.7)	36.2 (0.7)	36.3 (0.6)
	CON	34.1 (1.0)	37.4 (0.3)	35.1 (1.3)	35.9 (0.8)	36.0 (0.7)†	36.0 (0.7)	36.1 (0.7)	36.1 (0.7)	36.2 (0.8)
<u>MAP</u>										
M	ICE	87.2 (5.8)	-	77.7 (8.0)	77.8 (7.5)	80.3 (8.9)	84.0 (9.0)	78.8 (9.0)	81.0 (8.7)	82.2 (8.2)
	CON	87.3 (8.6)	-	79.9 (8.6)	75.3 (11.0)	79.5 (8.1)	80.2 (8.3)	76.5 (9.1)	77.1 (7.4)	81.7 (9.9)
F	ICE	84.0 (5.8)	-	79.2 (5.4)	85.2 (6.7)†	88.3 (5.6)†	85.2 (6.1)	84.2 (6.9)	81.6 (5.5)	83.5 (9.6)
	CON	83.5 (9.6)	-	79.8 (9.2)	79.8 (9.2)	80.5 (8.6)	80.8 (7.2)	80.8 (7.2)	85.0 (7.0)	81.0 (6.4)
<u>HR</u>										
M	ICE	74.5 (18.4)	178.9 (13.2)	108.2 (12.1)	101.9 (14.3)	96.3 (14.6)	93.4 (13.8)	94.2 (15.5)	95.7 (12.9)	99.5 (14.9)
	CON	75.7 (13.4)	177.9 (13.6)	109.5 (16.3)	106.8 (14.1)	99.4 (13.5)	97.3 (14.5)	97.9 (12.2)	96.9 (12.3)	96.4 (14.6)
F	ICE	74.4 (17.1)	171.2 (16.7)	103.8 (14.8)	93.7 (15.4)	87.2 (10.9)	90.6 (13.3)	91.6 (13.5)	91.5 (14.7)	92.2 (17.3)
	CON	75.2 (13.9)	171.3 (19.0)	102.9 (15.6)	98.9 (16.1)	93.6 (13.8)	91.5 (13.5)	89.4 (13.1)	93.0 (14.8)	90.0 (13.8)

Values are mean (SD).

M, male; F, female; *Significantly different between sexes; †Significantly different between trials (p < 0.05).

主観的指標

温熱感は、女性でのみ ICE 試行において CON 試行に比較して低い値を示し、ICE 試行の回復開始 10 分後には女性で男性に比較して低い値を示した。熱快適感は、男女間で差は見られず、男女ともに、試行間に差は見られなかった (Figure 4-2)。

平均血圧、心拍数および全身発汗量

平均血圧には男女間で有意な差は見られなかったが、女性においてのみ ICE 試行に比較して CON 試行で低い値を示した。心拍数には、男女間および試行間で差は見られなかった (Table 4-1)。また、全身発汗量にも男女間および試行間で有意な差は見られなかった (Male vs Female, ICE, 454.3 ± 172.3 vs 455.2 ± 82.0 ; CON, 539.7 ± 157.2 vs 475.8 ± 200.7)。

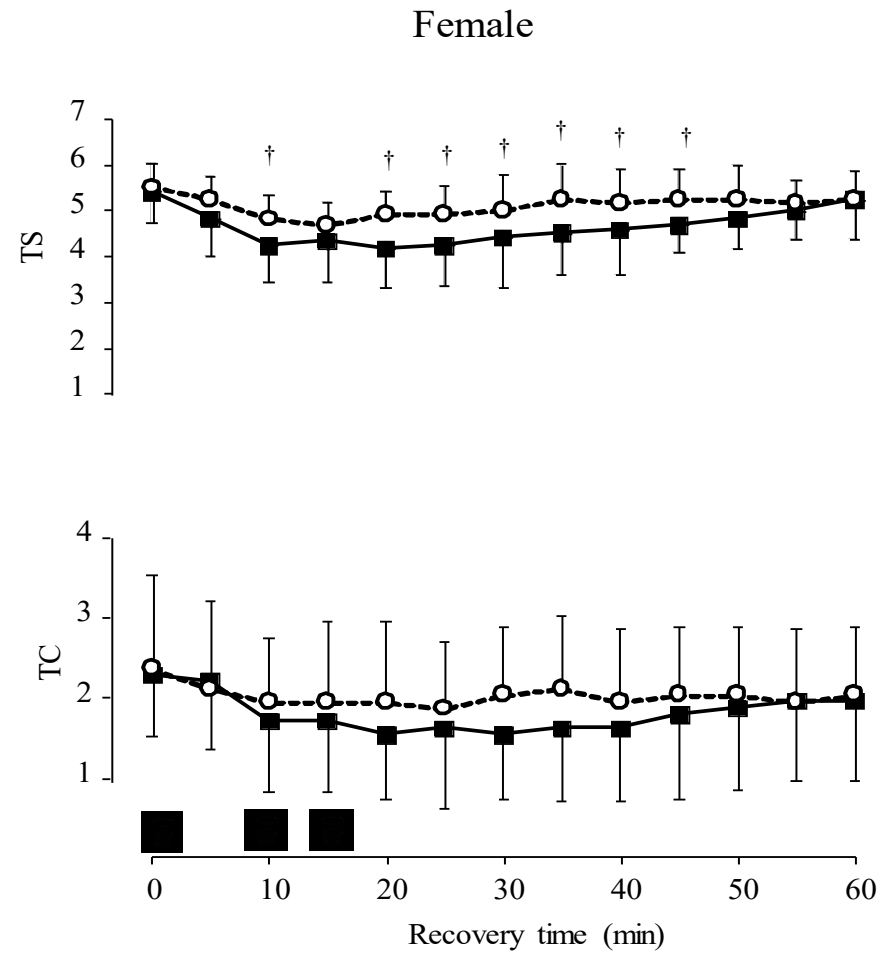
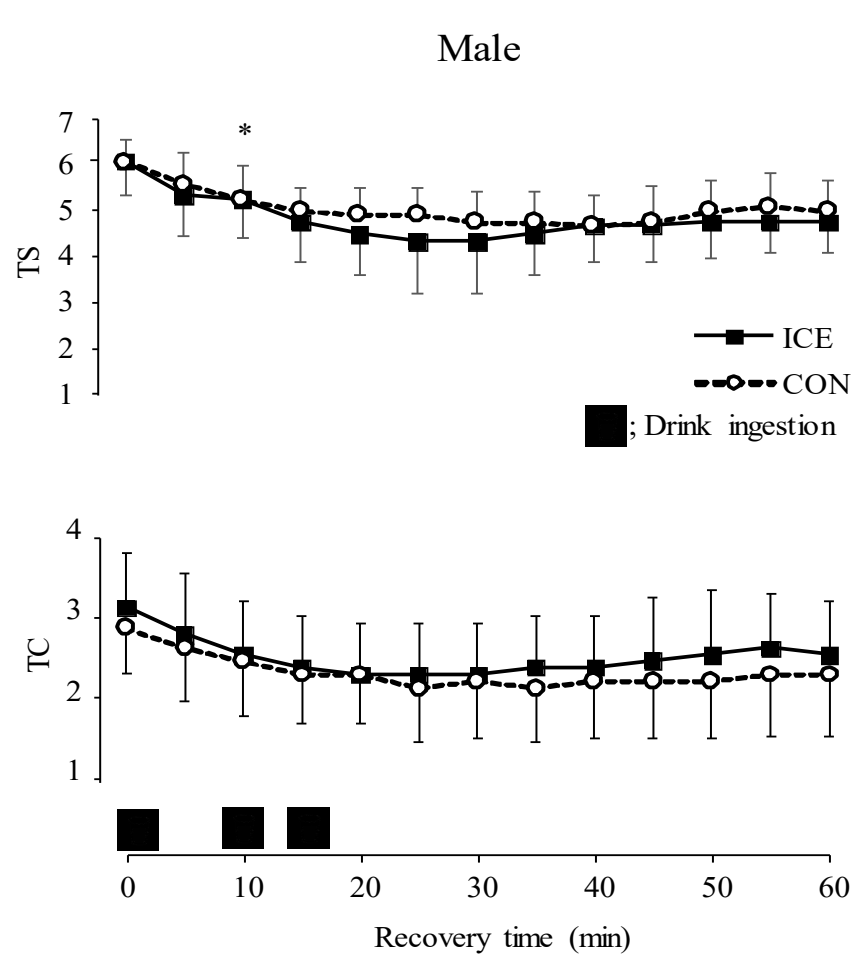


Figure 4-2. Thermal sensation (TS) and thermal comfort (TC) during recovery

*Significantly different between sexes in ICE; †Significantly different between trials

4.4 考察

本研究はアイススラリーを用いたポストクーリングとして男女間で直接比較した初めての研究である。その結果、アイススラリー摂取による直腸温および温熱感の低下効果は女性でのみ見られた。平均血圧については、女性でのみ運動後の血圧低下に抑制がみられたことから、アイススラリーによるポストクーリングは、女性の運動後低血圧を抑制する可能性を示した。

先行研究によると、女性では男性に比較して熱放散能力が低いことから、運動後の高体温が長く続くことが報告されている(Kenny & Jay, 2007; Kenny & McGinn, 2017)。そのため、アイススラリーによる効果が男性よりも大きく反映されたものと考えられる。体温の低下量から考えても、有意差はないものの、ICE 試行では女性の直腸温低下量が男性と比較してわずかに大きく (Male vs Female, -0.89°C vs -0.97°C)、CON 試行では女性の直腸温低下量がわずかに小さかったことから (-0.87°C vs -0.76°C)、女性では CON 試行における熱放散能力が小さく、ICE 試行においては冷却効果がより大きかったことが考えられる。

男性では、本研究においてアイススラリーによる体温の低下は観察されなかった。男性では暑熱環境下における運動後の回復期において、発汗が促されることが報告されている(Takatsu *et al.*, 2008)。一方で、アイススラリーによる冷却は、発汗を抑制することが知られている(Jay & Morris, 2018)。そのため、発汗による熱放散能力の高い男性にとって、発汗を抑制するアイススラリーによるポストクーリングは、発汗による本来の熱放散能力を減衰させ、冷却による体温低下の効果を相殺してしまった可能性が考えられる。実際に、全身発汗量では、男性において CON 試行に比較して ICE 試行で低い傾向が見られた ($p = 0.065$)。本研究のような乾燥した環境下 (湿度 40%RH) では、発汗による熱放散が有効であるため、発汗機能が抑制された男性ではアイススラリーによる体温低下効果が観察されなかったものと考えられる。

女性において運動後の熱放散能力が低下する理由として、運動後低血圧が男性に比較し

て起こりやすいことが挙げられる(Kenny & Jay, 2007; Kenny & McGinn, 2017)。先行研究では、運動後低血圧は、非温熱性の圧受容器反射によって発汗応答に影響を与えることが報告されている(Kenny *et al.*, 2003)。このような血管動態および発汗機能の減衰は、熱放散能力を低下させるが(Kenny & Journeay, 2010)、これらの減衰は、女性の方で起こりやすいことも示されている(Kenny & Jay, 2007)。

さらに、女性の熱放散能力は、皮膚血流に依存していることも知られている(Inoue *et al.*, 2005)。これらのことから、運動後の発汗による熱放散能力がもともと低い女性においては、アイススラリーによる冷却が体温低下を促したものと考えられる。また、女性におけるアイススラリーによる運動後低血圧の改善は、皮膚血流に依存して熱放散を行う女性にとっては有益であると考えられる。しかし、本研究では皮膚血流およびその他の循環指標などの測定をおこなっていないために、熱放散能に与える明確な効果については不明である。さらに、本研究の実験環境は皮膚温よりも高い環境温であったために、皮膚血管拡張による熱放散は体温調節に反映されにくかったものと推測される。一方で、アイススラリーによって女性における運動後の低血圧を改善するという新たな知見は、熱中症リスクの高い女性にとっては有益な情報であるといえる。

皮膚温は運動終了時点から回復期前半まで両試行ともに女性と比較して男性で高い値を示した。先行研究では、運動中に代謝性熱産生量の多かった男性では、回復期において皮膚温が高い状態を維持していたと報告されている(Takatsu *et al.*, 2008)。本研究においても同様の結果が得られ、アイススラリーによる皮膚温の低下は、女性でのみ一部の時間帯で見られた(回復 20 分地点)だけであった。アイススラリーによる冷却は、内部冷却によるものであるため、皮膚温を低下させる効果は冷水浴などの外部冷却に比較して低いが(Choo *et al.*, 2018)、直腸温の低下が確認された女性においては、深部体温の低下に伴って、暑熱刺激による皮膚温の上昇を抑制した可能性が考えられる。

温熱感においては、女性のみでアイススラリーによる改善が見られ、ICE 試行において

一部男女差がみられた（回復 10 分時点）。この温熱感の改善は、女性における直腸温の低下を反映したものと思われるが、女性では冷却に対する感受性が男性に比較して高いことから(Kaikaew *et al.*, 2018)、アイススラリーによって回復期の温熱感を低下させた可能性も考えられる。先行研究では、女性では低温環境において、冷感受容体である TRPM8 (Transient Receptor Potential Melastatin 8)の感受性が高いことが報告されている(Caudle *et al.*, 2017; Kaikaew *et al.*, 2018)。そのため、アイススラリーによる冷却においても、口や胃腸に存在する冷感受容体を刺激したことによって、同様の性差が確認されたとも考えられる。

これまでの温熱感などの主観的な指標の性差を検討した研究では、多くが寒冷暴露などの外部からの刺激による方法を用いていた(Hardy & Du Bois, 1940; Erlandson *et al.*, 2003; Golja *et al.*, 2003)。そのため、本研究は、暑熱環境下における運動誘発性高体温時の内部冷却において、温熱感の応答が男女間で異なることを示した初めての研究であるといえる。近年、温熱感の低下は、パフォーマンスにおいて重要な影響を与えることが報告されており(Siegel *et al.*, 2011; Stevens *et al.*, 2018)、女性における温熱感の低下は、その後の運動パフォーマンスの改善に寄与する可能性が期待される。

運動後の冷水浴による効果を男女で比較した先行研究では、冷却速度除脂肪量との間に有意な相関がみられたことを報告しており(Lemire *et al.*, 2009)、身体組成が外部からの冷却における高体温からの回復に影響することが知られている(Stephens *et al.*, 2018)。一方、本研究では身体組成と冷却効果において関連性は見られなかった。そのため、本研究のアイススラリーによるポストクーリングでは、冷却効果に身体組成は影響しないものと推測された。しかしながら、男性においては、アイススラリーによる冷却では深部体温が低下しなかったことから、アイススラリーのみでの冷却では、男性におけるポストクーリングの効果は得られず、その他の冷却との組み合わせを検討していくことが必要である。また、発汗による熱放散が難しい多湿環境下でアイススラリーを摂取した場合には、異なる結果が得ら

れる可能性も考えられる。さらに、運動後の熱放散能力に対する冷却効果を検討する際には、皮膚血流量や一回拍出量などの循環器系指標を測定するべきであると思われる。

これまでのアイススラリーを用いた女性の研究では、プレクーリングによるものが多く、運動パフォーマンスへの改善については報告されていなかった。本研究においては、運動パフォーマンスの測定は行っていないが、直腸温および温熱感が女性のみで低下したことを考えると、女性における冷却戦略として、運動前に行うプレクーリングよりも、運動中や運動後など、体温が上昇している状態からの冷却が効果的である可能性も考えられる。しかしながら、これらを明らかにするためにはさらなる研究が必要である。

本研究では、アイススラリーによるポストクーリングは女性の直腸温および温熱感を低下させ、運動後の低血圧を改善することが示唆された。一方、発汗機能の高い男性では、発汗を抑制するアイススラリーの摂取による体温低下効果は得られなかったと言えよう。

第五章 レジスタンス運動後の冷水浴が遅発性筋肉痛に与える性差の影響

5.1 緒言

運動やスポーツは、男女を問わず多くの人々に広く普及しているが、普段運動を行わない人が急激に運動を行うと様々な弊害が引き起こされる。その中で多くの人々が経験する症状の一つに、遅発性筋肉痛 (DOMS) がある。DOMS は、疲労感や心理的な不快感を伴うため、運動意欲の低下のみならず競技パフォーマンスの低下にも直結する (Russell *et al.*, 2016)。

DOMS は、不慣れな運動や高強度の伸張性運動によって引き起こされ、運動後 24~72 時間の間に痛みのピークが発現して、運動後 5~7 日間で消失することが報告されている (Cheung *et al.*, 2003)。その原因には、乳酸説、筋痙攣説、結合組織損傷説、炎症説、酵素流出説などが挙げられているが、この中で最も有力視されているのが、筋損傷による筋損傷説と、免疫反応による炎症説である。筋損傷による説明では、タイプ II 線維の Z 膜の崩壊によって、筋接合部にある侵害受容器が刺激されることで、痛みを生じさせる。この説は、筋内酵素の測定によって評価することができるといわれており、多くの先行研究では血清 CK 活性を用いている。一方、炎症説では、白血球や好中球の浸潤が、発痛物質であるヒスタミンの生成を促し、痛みを伝える侵害受容器を刺激するといわれており、血液中の白血球や好中球などを評価項目として用いている。しかしながら、いずれも、DOMS のピークと一致していないとする報告も多く、DOMS のメカニズムを評価する方法は未だ明らかになっていないのが現状である (Cheung *et al.*, 2003; Black, 2012)。

これに対して、これまでに栄養学的手法、マッサージ、電気刺激、温冷刺激などを用いた DOMS の軽減策が数多く検討されてきた。中でも冷水浴は、一般家庭でも実施可能な手段であり、スポーツ現場においてもアスリートのリカバリーを目的として用いられている。

冷水浴が DOMS の抑制に効果的であるという報告も数多い (Kuligowski *et al.*, 1998; Ingram *et al.*, 2009; Rowsell *et al.*, 2009; Ascensão *et al.*, 2011; Marquet *et al.*, 2015)。そ

の生理学的なメカニズムの一つとして、筋温の低下による組織代謝の低下が二次的な筋損傷を抑制することが挙げられている。また、静水圧による中心動脈への帰還血流量の増加が、代謝生成物などの迅速な除去に寄与するためとも考えられている。DOMS は、普段高強度のトレーニングを行うアスリートだけではなく、健康増進を目的とした一般成人においても起こり得る症状である。そのため、DOMS を抑制するための効果的な方法として冷水浴を検討することは重要であると思われる(Leeder *et al.*, 2012)。

しかし、冷水浴の効果には個人差および性差があるといわれており(Stephens *et al.*, 2018)、体脂肪率や骨格筋量などの違いがその差を生じさせている可能性が指摘されている(McArdle *et al.* 1992; Stephens *et al.* 2017)。実際に、運動後の高体温に対して、冷水浴は、男性よりも女性の方でより早く体温を低下させたことが報告されている(Lemire *et al.*, 2009)。また、身体組成の違いは、運動後のリカバリー効果にも影響を与えることが明らかとなっている(Stephens *et al.*, 2018)。

これらの先行研究より、体表面積が大きく、筋肉量の多い男性では、同条件での冷水浴を行った際に、その効果が女性よりも低い可能性が考えられる。一方で、皮下脂肪の厚い女性では、熱を産生している骨格筋から皮膚表面までの距離が長いことから、男性に比較して冷却効果が低い可能性も考えられる。そこで、本研究では、DOMS に対する同条件での冷水浴の効果に性差があるか否かを明らかにすることを目的とした。

5.2 方法

被験者

被験者は 22 歳から 27 歳までの健康な男女 16 名 (男性 8 名、女性 8 名) であり、一週間のうち 50 分ほどの運動習慣を有していたが、いずれも下肢のレジスタンス運動を行っていない者であった。また、女性被験者では月経周期を調査し、全員が卵胞期で本実験を行えるようにした。そのため月経不順の者、経口避妊薬を服用している者は被験者対象から除外し

た。実験当日、被験者は水以外の摂食を 2 時間以上禁止した状態で来室した。被験者には実験開始当日から実験終了時点までカフェインの摂取を禁止した。実験の前日から回復期測定終了までの間は、激しい運動やレジスタンス運動、サプリメントの摂取や暴飲暴食、下肢へのマッサージや長時間の温冷刺激は控えさせ、その他は実験前と同様の生活を送るように指示した。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会」の承認を得て行われた（承認番号 2017-049）。

事前測定

本実験の 1 週間以上前に、本実験での運動負荷強度を決定するために、レッグプレスおよびレッグエクステンションの最大挙上重量（1 repetition maximum; 1RM）を測定した。被験者は来室後に実験の目的、内容および予想される危険について十分な説明を受けた後に、同意書に署名をしたうえで実験に参加した。インピーダンス法による身体組成の測定と、質問紙による既往歴と症状の調査を行い、運動実施が可能であるか否かを事前に確認してから、トレーニング室にてレッグプレスとレッグエクステンションの 1RM の測定を行った。1RM の測定は、レッグプレス、レッグエクステンションの順で行い、軽めの負荷でウォーミングアップを行った後に、5 回以内の測定で 1RM を決定した。

実験プロトコル

実験プロトコル全体の流れを Figure 5-1 に示した。被験者は来室して、安静状態を保つた後に、医療従事者によって肘前静脈から採血された。その後、主観的筋肉痛（Visual analogue scale ; VAS）、大腿周径囲（Mid-thigh circumference ; CIR）、関節可動域（Range of motion ; ROM）およびカウンタームーブメントジャンプ（Counter movement jump; CMJ）の安静時測定を行った。測定の後、トレーニング室に移動して本運動を実施した。本運動での運動強度は開始時点では 75%1RM に設定し、10 回完遂できない場合には、次セット以

降負荷を 70%1RM に下げて行った。

本運動後直ちに VAS、CIR、ROM および CMJ を測定し、心電図用電極を装着した後、15 分間の冷水浴を行った。また、運動 2 時間後、24 時間後、48 時間後および 72 時間後に回復期の測定を行った。なお、採血は運動 2 時間後、24 時間後および 48 時間後の同時間帯に行った。

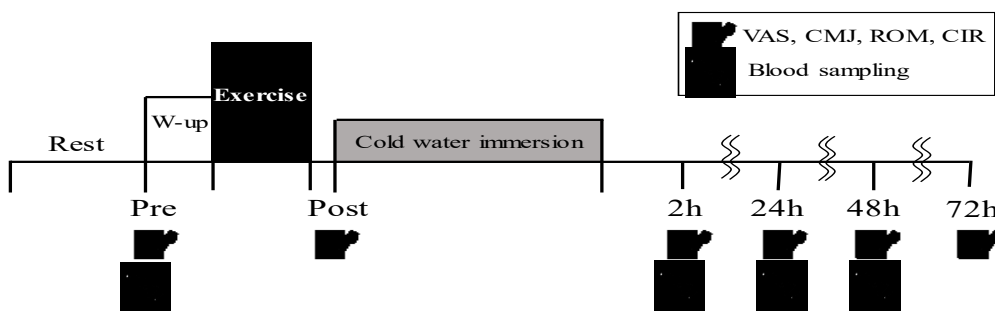


Figure 5-1. Experimental protocol.

TS: Thermal sensation, TC: Thermal comfort, VAS: Perceived soreness as measured by the visual analog scale, CIR: Mid-thigh circumference, ROM: Range of motion, CMJ: Counter movement jump.

運動内容

レッグプレスとレッグエクステンションは、いずれもトレーニング室のマシーン (Nautilus) を用いて実施した。レッグプレスは、事前の測定結果から算出した 75%1RM の半分の重量で 10 回のウォーミングアップを行い、1 分間の休憩を挟んだ後に、70~75% 1RM の強度で 10 回×3 セットを実施した。その後、レッグエクステンションも同様の手順で 10 回×3 セットを実施した。運動は、いずれの種目でも 1 秒で伸展、3 秒で屈曲させ、セット間および種目間の休憩は全て 1 分間とした。

冷水浴の方法

被験者は運動直後の測定を終えた後に、直ちに 15°C で 15 分間の冷水浴を行った。浸水は腸骨までとし、5 分毎にそれぞれ 1 分間の休憩を挟み、休憩時は室内にて座位安静状態で過ごした。冷水浴中は 5 分毎に血圧、心拍数、熱快適感、温熱感を測定した。熱快適感は、0 を「快適」、4 を「不快」とし、5 段階で評価した。温熱感は -4 を「とても寒い」、4 を「とても暑い」とし、9 段階で評価した。水温は 5 分毎に確認し、水温が上昇していた場合には ($\geq 16^{\circ}\text{C}$)、氷を入れて水温調節を行った。また、冷水浴を安全に遂行するために、常時心電図のモニタリングを行った。

測定項目

主観的筋肉痛

主観的筋肉痛 (VAS) の指標は、両脚の痛みを全く痛みがない状態を左端、考えられる最大の痛みを右端として、現在の痛みが 100mm の直線上のどの位置にあるかを記入させた。また座位状態 (安静) での痛みを VAS①、ハーフスクワット時の痛みを VAS②とした。

大腿周径囲、関節可動域、カウンタームーブメントジャンプ

CIR および ROM は筋損傷による浮腫を評価する指標として用い、筋損傷によって起こる浮腫の影響を見るために測定した。いずれも、利き足ではない足で測定を行った。CIR についてはメジャー (ムラテック KDS) を用いて、大転子から外側上顆の 50% 部分の周径囲を記録した。測定部分には最初の測定時に印を付け、72 時間後まで同様の位置にて測定した。ROM については、被験者を伏臥位にし、膝関節を最大努力で屈曲させた際の膝関節角度をゴニオメーターにて測定した。なお、基本軸は大腿骨、移動軸を腓骨とした。CMJ については下肢の伸展パワーを評価するために、ジャンプメーター (竹井機器工業) を用いて

測定した。いずれの項目も測定は各 3 回ずつ行い、その平均値を算出した。

血液指標

採血により得られた血液 (5mL) は、1mL を用いて白血球数 (White blood cell ; WBC) と NEUT の分析のために多項目自動血球計数装置 (pocH-100i, sysmex) にて測定し、残りの 4mL は 30 分以上静置した後に、10°C、3000 回転で 15 分間遠心分離をして血清を得た。得られた血清は、分析まで -80°C にて冷凍保存した。血清 CK 活性および血清ミオグロビン (Myoglobin ; Mb) 濃度の分析は、外部機関 (BML, Inc.) に依頼した。なお、外注した 2 項目の同時再現性係数 (Intra-assay CV) は CK で 1.6%、Mb で 3.7% であった。また、多項目自動血球係数装置で測定した WBC および NEUT の CV はそれぞれ 1.5% および 3.1% であった。

統計処理

解析結果は全て平均値±標準偏差で示した。CIR、ROM、CMJ および血液指標は、絶対値の他に、安静値の差を排除するために、安静値からの変化量で統計処理を行った。両群の身体組成の比較には、対応のない t 検定を用いた。また、男女間における測定値の比較には、繰り返しのある二元配置の分散分析 (時間×性差) を行った。さらに、それぞれの測定項目の関係および回復量と身体組成の関係については、絶対値および変化量それぞれをピアソンの相関関係を用いて検証した。統計処理は、SPSS (SPSS ver.20 for windows) を用いて行い、統計学的有意水準は危険率 5% 未満とした。

5.3 結果

血液検査の結果により、安静値の CK 活性および Mb 濃度が正常値より大きく外れていた女性 2 名（CK；1,908U/L, Mb;240ng/mL と CK；20,591U/L, Mb；925ng/mL）の結果をデータから除外した。そのため、以下に示す結果は全て女性 6 名、男性 8 名による値である。

身体組成

身体組成を Table 5-1 に示した。身長、体重、除脂肪量、骨格筋量、下肢筋肉量および体表面積では、男性が有意に高く、体脂肪率および下肢脂肪量では女性が有意に高い値を示した。

Table 5-1. Characteristics of subjects

	Female (n=6)	Male (n=8)
Age (years)	24.4 ± 1.8	23.0 ± 1.1
Height (m)	1.58 ± 0.04	1.69 ± 0.02*
Weight (kg)	52.6 ± 1.9	60.6 ± 8.1**
% Body fat (%)	25.5 ± 4.3	14.4 ± 6.4*
BMI (kg/m)	20.9 ± 1.2	21.5 ± 2.7
Fat free mass (kg)	39.2 ± 2.8	52.3 ± 4.2**
Skeletal muscle mass (kg)	21.2 ± 1.7	29.4 ± 2.6*
Body fat mass (kg)	13.4 ± 2.3	9.1 ± 5.3
BSA (m ²)	1.5 ± 0.03	1.6 ± 0.10*
BSA:M (m ² /kg)	0.028 ± 0.001	0.027 ± 0.002
Leg fat mass (kg)	5.0 ± 0.6	3.1 ± 1.4**
Leg muscle mass (kg)	12.2 ± 0.9	17.0 ± 1.4**
1 RM of leg press (kg)	112.4 ± 15.9	151.4 ± 19.6**
1 RM of leg extension (kg)	57.8 ± 14.4	73.8 ± 13.6*

Data are mean ± SD. BMI, body mass index; BSA, body surface area; BSA:M, body surface area to mass ratio; Significantly different between Male vs Female *: p <0.05, **: p <0.01

冷水浴中の温熱感、熱快適感

冷水浴中の温熱感 (Thermal sensation) および熱快適感 (Thermal comfort) の結果を、Table 5-2 に示した。温熱感では、時間による主効果および交互作用が見られたが、熱快適感では、時間および性別による主効果は見られなかった。

Table 5-2. Thermal sensation and thermal comfort during cold-water immersion

		5 min	10 min	15 min	Time	Sex	Interaction
Thermal sensation (point)	Female	-2.2 ± 1.3	-2.2 ± 1.6	-2.2 ± 1.1	< 0.05	n.s.	< 0.05
	Male	-2.5 ± 1.1	-1.3 ± 0.8†	-1.1 ± 1.1†			
Thermal comfort (point)	Female	2.7 ± 0.7	2.7 ± 0.7	2.5 ± 0.5	n.s.	n.s.	n.s.
	Male	2.5 ± 1.1	1.6 ± 0.8	1.6 ± 1.3			

†: Significantly different vs 5 min; Female: n=6, Male: n=8

遅発性筋肉痛

VAS①および VAS②ともに時間による主効果が見られたが、いずれにも交互作用は見られなかった (Figure 5-2)。

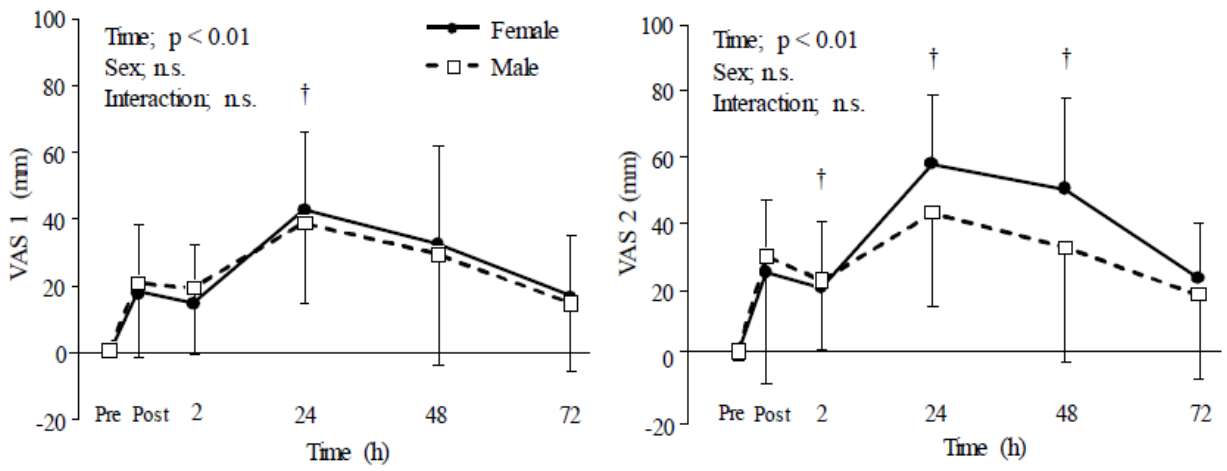


Figure 5-2. Visual analog scale for perceived muscle soreness.

(a)VAS 1, muscle soreness at rest; (b)VAS 2, muscle soreness during a half squat; †, Significantly different vs pre; Female: n=6, Male: n=8

大腿周径囲、関節可動域、カウンタームーブメントジャンプ

絶対値による CMJ には時間による主効果が見られ、CMJ および ROM には性別による主効果が見られた。しかしながら、いずれの項目にも交互作用は見られなかった。変化量では、CMJ および CIR に時間による主効果とともに、CIR には交互作用が見られた (Table 5-3)。

血液指標

CK 活性では、絶対値において性別による主効果が見られたが、変化量では CK 活性および Mb 濃度のいずれにも主効果は見られなかった。WBC および NEUT では絶対値、変化量ともに時間による主効果が見られたが、交互作用は見られなかった (Table 5-4)。

Table 5-3. Changes in mid-thigh circumference (CIR), range of motion (ROM) and countermovement jump (CMJ) (changes in value from Pre)

		Pre	Post	2 h	24 h	48 h	72 h	Time	Sex	Interaction
CIR (cm)	Female	47.7 ± 2.0 ^a	48.7 ± 2.4 (1.0 ± 0.5)	47.5 ± 2.4 ^a (-0.2 ± 0.6) ^a	48.1 ± 2.0 ^a (0.4 ± 0.7)	48.1 ± 2.1 ^a (0.4 ± 0.7)	48.1 ± 2.0 ^a (0.4 ± 1.0)	< 0.05	n.s.	n.s.
	Male	47.8 ± 4.4 ^a	49.1 ± 4.1 (1.3 ± 0.6)	48.3 ± 4.3 ^a (0.5 ± 0.7) ^a	47.8 ± 4.3 ^a (0.0 ± 0.8) ^a	48.1 ± 4.0 ^a (0.3 ± 0.8) ^a	48.0 ± 4.1 ^a (0.2 ± 0.6) ^a	(< 0.05)	(n.s.)	(< 0.05)
ROM (°)	Female	135.3 ± 2.7	134.1 ± 3.7 (-1.3 ± 1.6)	131.7 ± 5.4 (-3.7 ± 3.5)	133.9 ± 2.8 (-1.4 ± 1.7)	133.7 ± 3.0 (-1.6 ± 3.6)	133.7 ± 5.6 (-1.6 ± 6.2)	n.s.	n.s.	n.s.
	Male	129.3 ± 6.2	126.3 ± 9.8 (-3.0 ± 6.2)	128.6 ± 9.3 (-0.7 ± 6.3)	126.3 ± 8.0 (-3.0 ± 3.6)	129.3 ± 9.6 (0.0 ± 5.5)	127.7 ± 8.4 (-1.6 ± 3.3)	(n.s.)	(n.s.)	(n.s.)
CMJ (cm)	Female	32.6 ± 3.4	29.1 ± 3.7 ^b (-3.6 ± 1.7)	29.8 ± 5.3 ^b (-2.8 ± 3.4)	29.8 ± 4.4 (-2.8 ± 3.1)	31.4 ± 2.7 (-1.2 ± 1.8)	32.3 ± 1.6 (-0.3 ± 3.0) ^a	< 0.05	< 0.05	n.s.
	Male [*]	41.5 ± 2.6	35.7 ± 4.1 ^b (-5.8 ± 4.5)	37.6 ± 3.1 ^b (-3.9 ± 3.1)	38.0 ± 3.6 (-3.5 ± 5.2)	40.0 ± 4.3 (-1.5 ± 3.5)	40.8 ± 2.7 (-0.8 ± 1.8) ^a	(< 0.05)	(n.s.)	(n.s.)

^a, Significantly different vs. Post; ^b, Significantly different vs Pre; ^{*}, Significantly different in main effect vs Female; Female: n=6, Male:

n=8

Table 5-4. Changes in blood marker for muscle damage (changes in value from Pre)

		Pre	2 h	24 h	48 h	Time	Sex	Interaction
CK (U/L)	Female	88.8 ± 32.7	104.8 ± 46.5 (16.0 ± 15.1)	108.2 ± 52.4 (19.3 ± 22.2)	91.0 ± 35.2 (2.2 ± 8.9)	n.s.	< 0.05	n.s.
	Male*	145.1 ± 83.3	170.0 ± 85.6 (24.9 ± 8.6)	175.0 ± 56.6 (29.9 ± 38.5)	216.3 ± 125.4 (71.1 ± 139.5)	(n.s.)	(n.s.)	(n.s.)
Mb (ng/ml)	Female	21.1 ± 4.2	33.9 ± 4.2 (12.9 ± 6.0)	21.5 ± 3.5 (0.5 ± 2.7)	22.0 ± 6.3 (0.9 ± 4.7)	n.s.	n.s.	n.s.
	Male	27.8 ± 10.7	57.7 ± 25.4 (29.9 ± 20.2)	32.8 ± 13.5 (5.0 ± 14.9)	95.4 ± 144.2 (67.6 ± 139.8)	(n.s.)	(n.s.)	(n.s.)
WBC (·10²/μL)	Female	60.7 ± 11.1	73.8 ± 13.7 (13.2 ± 7.3)	59.8 ± 10.8 ^c (-0.8 ± 4.0) ^c	60.2 ± 8.5 ^c (-0.5 ± 11.5) ^c	< 0.05	n.s.	n.s.
	Male	70.4 ± 18.5	84.3 ± 25.0 (13.9 ± 23.5)	59.4 ± 14.6 ^c (-11.0 ± 9.9) ^c	62.6 ± 15.1 ^c (-7.8 ± 11.1) ^c	(< 0.05)	(n.s.)	(n.s.)
NEUT (·10²/μL)	Female	39.2 ± 14.0 ^c	52.8 ± 13.3 (13.7 ± 7.8)	36.7 ± 12.0 ^c (-2.5 ± 4.5) ^c	36.7 ± 11.2 ^c (-2.5 ± 9.1) ^c	< 0.05	n.s.	n.s.
	Male	39.5 ± 12.0 ^c	58.9 ± 23.8 (19.4 ± 23.4)	34.5 ± 7.7 ^c (-5.0 ± 7.8) ^c	35.8 ± 6.8 ^c (-3.8 ± 9.7) ^c	(< 0.05)	(n.s.)	(n.s.)

CK, creatine kinase; Mb, myoglobin; WBC, white blood cell and NEUT, neutrophil; ^c, Significantly different vs. 2h;

* , Significantly different in main effect vs Female; Female: n=6, Male: n=8

筋肉痛との関連性

2 時間後の WBC の変化量と 24 時間後の VAS①および VAS②との間に有意な正の相関関係が見られた (Figure 5-3)。また、図には示していないが、2 時間後の NEUT の変化量との間にも統計的な有意傾向が見られた。

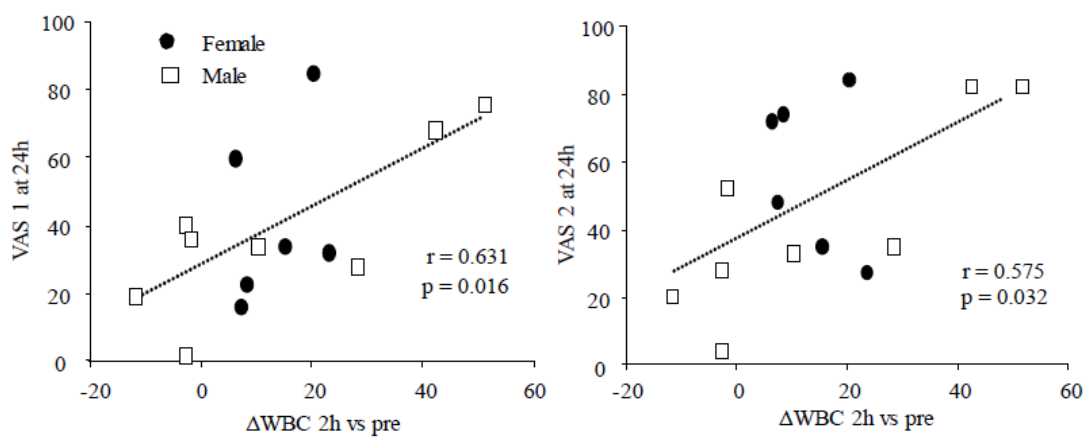


Figure 5-3. Associations between VAS at 24 hours and ΔWBC at 2 hours.

(a)VAS 1 at 24 hours and ΔWBC at 2 hours; (b)VAS 2 at 24hours and ΔWBC at 2 hours;
Female: n=6, Male: n=8

5.4 考察

本研究では、男女ともに運動による筋肉痛が VAS によって確認され、WBC および NEUT の増加も見られた。一方で、筋損傷マーカーである CK 活性および Mb 濃度には運動による主効果は確認できなかった。また、これらすべての項目において男女間の差は観察されなかった。この結果は、除脂肪量が多い男性でも、冷水浴（15°C、15 分）において女性と同様の効果であったことを示した。

先行研究では、運動後の冷水浴において男性よりも女性の方で早く体温が低下したことが示されており、その冷却効果が除脂肪量に関連していることが報告されている(Lemire *et al.*, 2009)。また、体重当たりの体表面積 (BSA:M) および除脂肪量は筋温の低下と関連することが示されている(Stephens *et al.*, 2018)。本研究では、DOMS とこれら身体組成との間に関連は見られなかったことから、男女間で差が見られなかったものと考えられる。また、BSA:M に男女間で差が見られなかったことも、男女間で差が見られなかった理由の一つであると考えられる。

本研究では、VAS が男女とも運動後 24 時間で有意に上昇したが、血清 CK 活性および Mb 濃度の上昇はみられなかった。それゆえ、上昇した痛みは、筋損傷を反映する血液マーカーからは説明できなかった。また、VAS によって評価された DOMS の上昇は筋損傷由来ではない可能性が考えられる。CK における性差の主効果は観察されたが、交互作用は見られなかったことより、この主効果は、冷水浴や運動による影響ではなく、安静時の潜在的な性差が影響したものと考えられる。本研究の運動強度は、男性で 74.7%1RM、女性で 74.2%1RM であり、相対的に同一強度であるとともに、運動種目（レッグプレスおよびレッグエクステンション）も Staron *et al.* (1992) および Stupka *et al.* (2000) と同様であった(Staron *et al.*, 1992; Stupka *et al.*, 2000) ことから、その理由を説明することはできなかった。

先行研究によると、血清 CK 活性のピーク値には個人差はあるものの、本研究と同様のレ

ジスタンス運動を行った後には、男性では 500～1000 U/L、女性では 150～300 U/L 程度まで上昇している(Staron *et al.*, 1992; Stupka *et al.*, 2000)。本研究では、男性でピーク値は平均で 216 U/L、女性で 108 U/L 程度であり、先行研究に比較して少なかった。このことは、本研究における被験者にとって運動強度が低かった可能性が考えられるが、冷水浴によってこれら筋損傷マーカーの上昇が抑制された可能性も示唆される。冷水浴によって CK 活性の上昇が抑制されたという先行研究では、コントロール（座位安静）と比較して冷水浴を行なった試行では、本研究と同様にほとんど変動していなかった(Vaile *et al.* 2008b)。局所的な冷水浴は、筋血流量を制限し(Vaile *et al.* 2011)、筋損傷の間接的マーカーとして用いられる細胞内酵素の漏出を抑制する可能性があり(Pournot *et al.* 2011)、そのため、本研究でも CK 活性が上昇しなかった可能性も考えられる。

一方、Mb 濃度の上昇抑制に対する冷水浴の効果は一致しておらず(Bailey *et al.*, 2007; Ascensão *et al.*, 2011; Gonzalez *et al.*, 2014; Roberts *et al.*, 2014; Jajtner *et al.*, 2015)、冷水浴後の Mb 濃度の違いにどのようなメカニズムが関与しているのかは依然として不明である(Bailey *et al.*, 2007)。さらに、女性では男性に比較して、CK 活性とは異なり、卵胞期において Mb 濃度の上昇が少ないことが報告されている(Minahan *et al.*, 2015)。そのため、本研究では冷水浴の効果および性差について Mb 濃度の結果から議論することは困難であるといえる。

対照的に、炎症関連マーカーである WBC および NEUT については、運動による主効果が見られ、運動 2 時間後に最も大きな値を示していた。NEUT は、筋損傷マーカーと関連しているといわれているが、本研究において筋損傷マーカーである CK 活性および Mb 濃度には運動による主効果は観察されなかったが、WBC および NEUT は、一般的に損傷組織の除去・修復に寄与するとされており、本研究においても運動による物理的な刺激によって組織に損傷が起きた可能性を否定することはできない。このような WBC および NEUT の増加を伴う炎症反応は、腫脹・発熱・疼痛を引き起こすとされる。実際に、運動直後およ

び2時間後のVASは上昇していた。しかしながら、この際の痛みはDOMSの特徴である24～72時間後に起こる痛みとは異なるものであると考えられる。

一方、本研究においてDOMSのピークは男女ともに運動24時間後であったため、WBCおよびNEUTのピークとは一致しなかったが、運動24時間後のVAS①およびVAS②と運動2時間後のWBCのピークとの間には有意な正の相関関係が見られた(Figure 5-3)。同様に、運動24時間後のVAS①およびVAS②と運動2時間後のNEUTにも正の相関傾向が見られた。ピークのタイミングはずれていることから、炎症反応に関わるWBCとNEUTの増加が、DOMSと一部関連している可能性を示唆するものである。白血球や好中球の浸潤は、発痛物質であるヒスタミンやプロスタグランジンE₂の生成を促し、痛みを伝える侵害受容器を刺激することが知られている(Cheung *et al.* 2003)。さらに、2時間で観察されたような急性炎症反応は、二次的な筋肉損傷の一因となり、痛みや障害の知覚を高めることがある。したがって、本研究においてCK活性の上昇やMb濃度の上昇がみられなかったことを考えると、白血球と好中球によって引き起こされる発痛物質の活性化が、部分的にDOMSに関連していた可能性が示唆される。冷水浴が炎症反応に対して効果的でない可能性があるという報告もあるため、炎症反応に対する冷水浴の効果を調査するには、さらに詳細な研究が必要であり、効果の有無について明らかにする必要がある(White *et al.*, 2014; Peake *et al.*, 2017)。

DOMSのピークは浮腫のピークと一致することから(Cheung *et al.* 2003)、浮腫は筋損傷の程度を観察する有効な指標であるといわれている(Warren *et al.*, 1999)。そこで、本研究では浮腫の指標としてCIRおよびROMの測定を行った。ROMでは運動による主効果は見られなかったものの、CIRの変化量では運動による主効果および交互作用が確認された(Table 5-3)。本研究で見られたCIRの増大は、運動直後のみ有意に増加していることから、運動による一時的な増加であったと考えられる。その後、DOMSのピーク時においてCIRは増大していないため、冷水浴によって浮腫の増大が抑制された可能性も考えられる。

いずれにしても性差は見られなかったため、本研究の結果から DOMS と関わる浮腫に対する冷水浴の効果に性差の影響はないといえる。

冷水浴中の測定項目では、温熱感にのみ男女間で交互作用が見られた (Table 5-2)。男性では時間を追うごとに温熱感が上昇したが、女性では冷水浴終了まで低いままであった。この結果は、男女間で冷水に対する温熱感が異なることを示唆している。温熱感は皮膚温に関連するため、女性では男性と比較して代謝性熱産生量が低く、特に寒冷環境において皮膚温がより低下する (Hardy & Du Bois, 1940) ことと関連しているものと思われる。皮膚温の低下による冷感冷感受容体である TRPM8 によって伝達されることが知られており、その受容体の感受性はオスに比較してメスで高いことが報告されている (An *et al.*, 2018)。そのため、本研究においても、冷水浴中の熱産生が男性の方で大きく、温熱感の変化に関連している可能性が考えられる。

本研究にはいくつかのリミテーションがある。一つ目は、コントロール群を設定しなかったことである。この研究と同様の運動を行った先行研究では、CK 活性は男性と女性の両方で大幅に増加していた (Stupka *et al.*, 2000, 2001)。冷水浴による DOMS 抑制の性差を明確にするためには、コントロール群を設定する必要がある。次に、筋損傷を客観的に評価するために血液分析を行ったが、CK と Mb は変化しなかった。したがって、組織学的評価に関するさらなる検討が必要である。第三に、体組成の違いに着目した実験を行うために、すべての女性は月経周期の卵胞期で実験を行った。女性ホルモンの影響を調べるため、または同様の体組成の男性と女性における冷水浴の影響を調査するために、黄体期の実験を行う必要があるかもしれない。さらに、冷水浴は筋肉の順応に悪影響を及ぼすことが報告されていることから (Roberts *et al.*, 2015)、スポーツ現場で冷水浴を使用する場合には、それぞれの目的に合わせて冷水浴を最適化することが重要である。

第六章 総合討論

6.1. 本研究の成果

研究課題 1 の結果より、アイススラリー摂取によるプレクーリングの持久性運動パフォーマンスへの効果に性差はないことが示された。また、運動後半には主観的指標に差が見られた。これには、温熱ストレスに対する男女の感受性の違いが影響していたことが考えられる。本課題では、実際のトレーニング等を想定して運動を相対強度で行ったため、女性では男性に比較して代謝性熱産生量が小さく、運動継続時間が有意に長かった。一方で、発汗機能による差も見られず、運動継続時間の個人差も大きかったことから、今後その原因について検討する必要がある。

研究課題 2 の結果より、アイススラリー摂取によるポストクーリングは、女性でのみ体温の低下および熱快適感を改善することが示された。本課題は、ポストクーリングによるアイススラリーの効果を検討した初めての研究であった。男性では、もともとの発汗能力が女性よりも高いために、アイススラリー摂取によって発汗が抑制されて、その冷却効果が相殺された可能性が示唆される。

研究課題 3 から、運動後の冷水浴が DOMS に与える影響に性差はないことが示された。一方、冷水浴中の温熱感には交互作用が見られ、男女で異なる応答が観察された。DOMS を抑制することを目的として運動後に行う場合には、性差を考慮する必要がないことを示唆するものである。

本研究では、持久性運動パフォーマンスの改善を目的としたアイススラリー摂取によるプレクーリングと、DOMS 抑制を目的とした冷水浴によるポストクーリングにおいて、性差による影響は見られなかった。一方で、体温の速やかな低下を目的としたアイススラリー摂取によるポストクーリングでは、女性でのみ冷却効果が得られた。3 つの研究課題より、プレクーリングおよび DOMS 抑制目的のポストクーリングにおいては、性差を考慮する必要性は低いものの、暑熱環境下における運動の体温上昇の抑制および高体温からの回復に

における身体冷却においては、男女で適切なプロトコルを考案することが必要であることが示唆された。さらに、研究課題 1 および 2 より、女性におけるアイススラリー摂取による身体冷却は、プレクーリングよりポストクーリングの方で有効である可能性が示された。また、これまでの先行研究を考慮しても、女性におけるプレクーリングによる運動パフォーマンスへの効果は得られないものと思われる。そのため、女性では運動前の体温の低下よりも運動中や運動後の体温の低下効果が大きい可能性が考えられる。

また、全ての実験結果において、主観的指標は男女間で異なる応答を示した。研究課題 1 および 2 で行われた主観的指標の性差の比較は、アイススラリー摂取による内部クーリングを用いて行われたものである。これまでの先行研究では、冷却刺激による主観的指標の性差における検討は、すべて外部冷却によるものであったため、その差は皮膚からの温熱感受性による違いを示している。研究課題 1 で行ったプレクーリングの研究では、運動の後半に熱快適性の性差が確認された。しかしながら、冷却時にのみ着目すると男女間で差は見られなかった。

本研究ではプレクーリングを、暑熱環境下で行ったために、皮膚には温熱刺激が、口や胃腸には寒冷刺激が加わっていた。冷却時に性差は見られなかったことから、口や胃腸における寒冷刺激には性差はないことが示された。また、運動後半に見られた性差は、体内の代謝性熱産生量によって生じたものであると考えられる。一方、研究課題 2 で行ったポストクーリングでは、ICE 試行および CON 試行の双方において、男女間で異なる応答を示した。そのため、体温の上昇が起こっている状態では、冷却刺激による性差が生じた可能性が示唆された。研究課題 3 による冷水浴中の温熱性の性差については、皮膚からの刺激による外部冷却であったため、先行研究と同様に、冷却の感受性が男女で異なることに関連していたと思われる(Kaikaew *et al.*, 2018)。これらの結果から、内部冷却と外部冷却による主観的指標の性差においては異なる応答を示す可能性が示唆された。

6.2. 今後の展望

研究課題 1 では、アイススラリーによるプレクーリングの性差を明らかにすることはできなかつた。運動継続時間には、大きな個人差がみられ、実際に時間が延長した人としなかつた人とが混在していた。これまでの研究でも、運動パフォーマンスの改善を報告しているものとしていないものが存在する。そのため、アイススラリー摂取によるプレクーリングでは、個人差が大きいものと考えられる。しかしながら、本研究では、男女 24 名のデータからその原因を明らかにすることは出来なかつた。また、本研究では運動において相対強度による設定を用いたために、男女で代謝性熱産生量を統一することができなかつた。冷却効果とその後の運動における体温調節機能を検討するためには、代謝性熱産生量をそろえた運動において詳細に調査すべきである。さらに、発汗による熱放散能が小さくなる多湿環境下においても効果を検討する必要がある。

研究課題 2 では、アイススラリーによるポストクーリングの効果が女性のみで確認された。しかしながら、男性において体温の低下が見られなかつた詳細な原因は明らかにできなかつた。運動後の熱放散能力を詳細に検討するためには、局所発汗量および皮膚血流量の測定を行う必要がある。また、研究課題 1 と同様に、多湿環境下での検討も必要であると考えられる。さらに、本研究のポストクーリング後では安静にて応答を観察したが、体温低下後のパフォーマンスを検討することは、実際のスポーツ現場において重要である。そのため、今後、運動の間に行う冷却効果や運動中に行う冷却の効果を、特に女性に着目して検討を進める必要がある。

研究課題 3 では、冷水浴による DOMS への抑制効果に性差は見られなかつた。本研究ではコントロール試行を設定しなかつた。そのため、実際に DOMS に対して効果があつたか否かについては明らかではない。しかしながら、身体冷却による効果について性差が、DOMS のような筋肉の炎症抑制の目的で行う場合に生じる可能性は低いと考えられる。したがって、今後身体冷却の性差について検討を行う場合には、体温調節機能に着目して、冷

却戦略を最適化していくことが必要である。

実際のスポーツ・運動場面における男女でそれぞれ有効な冷却プロトコルを考案する際には、女性では運動前に行うプレクーリングよりも、運動中や運動の間に冷却を行うことが有効である可能性が考えられる。一方で、男性では運動時における代謝性熱産生量が大きいため、先行研究の結果も併せて考慮すると、アイススラリーによるプレクーリングが有効であると考えられる。これらを踏まえて今後は、タイミングを考慮した冷却効果の比較を男女で行っていくことが必要であろう。

参考文献

- An JY, Ahn C, Kang HY & Jeung E-B (2018). Inhibition of mucin secretion via glucocorticoid-induced regulation of calcium-related proteins in mouse lung. *Am J Physiol Cell Mol Physiol* **314**, L956–L966.
- Andérson GS, Ward R & Mekjavić IB (1995). Gender differences in physiological reactions to thermal stress. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* **71**, 95–101.
- Arngrímsson SÁ, Pettitt DS, Stueck MG, Jorgensen DK & Cureton KJ (2004). Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. *J Appl Physiol* **96**, 1867–1874.
- Ascensão A, Leite M, Rebelo AN, Magalhães S & Magalhães J (2011). Effects of cold water immersion on the recovery of physical performance and muscle damage following a one-off soccer match. *J Sports Sci* **29**, 217–225.
- Bailey DM, Erith SJ, Griffin PJ, Dowson A, Brewer DS, Gant N & Williams C (2007). Influence of cold-water immersion on indices of muscle damage following prolonged intermittent shuttle running. *J Sports Sci* **25**, 1163–1170.
- Bazett HC, Scott JC, Maxfield ME & Blithe MD (1937). Effect of Baths At Different Temperatures on Oxygen Exchange and on the Circulation. *Am J Physiol Content* **119**, 93–110.
- Bergh U & Ekblom B (1979). Physical performance and peak aerobic power at different body temperatures. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* **46**, 885–889.
- Beshir MY & Ramsey JD (1981). Comparison between male and female subjective estimates of thermal effects and sensations. *Appl Ergon* **12**, 29–33.
- Bigland-Ritchie B, Thomas CK, Rice CL, Howarth J V. & Woods JJ (1992). Muscle temperature, contractile speed, and motoneuron firing rates during human

- voluntary contractions. *J Appl Physiol* **73**, 2457–2461.
- Black CD (2012). Muscle Pain During and Following Exercise. In *The Oxford Handbook of Exercise Psychology*. Available at: www.oxfordhandbooks.com.
- Bongers CCWG, Hopman MTE & Eijsvogels TMH (2017). Cooling interventions for athletes: An overview of effectiveness, physiological mechanisms, and practical considerations. *Temperature* **4**, 60–78.
- Bongers CCWG, Thijssen DHJ, Veltmeijer MTW, Hopman MTE & Eijsvogels TMH (2015). Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: A meta-analytical review. *Br J Sports Med* **49**, 377–384.
- Booth J, Marino F & Ward JJ (1997). Improved running performance in hot humid conditions following whole body precooling. *Med Sci Sports Exerc* **29**, 943–949.
- Bredella MA (2017). Sex differences in body composition. *Adv Exp Med Biol* **1043**, 9–27.
- Bulbulian R, Shapiro R, Murphy M & Levenhagen D (1999). Effectiveness of a Commercial Head-Neck Cooling Device. *J Strength Cond Res* **13**, 198–205.
- Burdon C, O'Connor H, Gifford J, Shirreffs S, Chapman P & Johnson N (2010). Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions. *J Sports Sci* **28**, 1147–1156.
- Casa DJ (2018). *Sport and Physical Activity in the Heat*.
- Casa DJ, DeMartini JK, Bergeron MF, Csillan D, Randy Eichner E, Lopez RM, Ferrara MS, Miller KC, Sawka MN & Yeargin SW (2015). National Athletic Trainers' Association Position Statement: Exertional Heat Illnesses. *J Athl Train* **50**, 986–1000.
- Casa DJ, McDermott BP, Lee EC, Yeargin SW, Armstrong LE & Maresh CM (2007). Cold water immersion: The gold standard for exertional heatstroke treatment.

- Exerc Sport Sci Rev* **35**, 141–149.
- Castle PC, Macdonald AL, Philp A, Webborn A, Watt PW & Maxwell NS (2006). Precooling leg muscle improves intermittent sprint exercise performance in hot, humid conditions. *J Appl Physiol* **100**, 1377–1384.
- Caudle RM, Caudle SL, Jenkins AC, Ahn AH & Neubert JK (2017). Sex differences in mouse Transient Receptor Potential Cation Channel, Subfamily M, Member 8 expressing trigeminal ganglion neurons. *PLoS One*; DOI: 10.1371/journal.pone.0176753.
- Cheung K, Hume PA & Maxwell L (2003). Delayed onset muscle soreness: treatment strategies and performance factors. *Sport Med* **33**, 145–164.
- Cheung SS & Sleivert GG (2004). Multiple triggers for hyperthermic fatigue and exhaustion. *Exerc Sport Sci Rev* **32**, 100–106.
- Choo HC, Nosaka K, Peiffer JJ, Ihsan M & Abbiss CR (2018). Ergogenic effects of precooling with cold water immersion and ice ingestion: A meta-analysis. *Eur J Sport Sci* **18**, 170–181.
- Cotter JD, Sleivert GG, Roberts WS & Febbraio MA (2001). Effect of pre-cooling, with and without thigh cooling, on strain and endurance exercise performance in the heat. *Comp Biochem Physiol - A Mol Integr Physiol* **128**, 667–677.
- Dannecker EA, Koltyn KF, Riley JL & Robinson E (2003). Sex differences in delayed onset muscle soreness. *J Sports Med Phys Fitness* **43**, 78–84.
- Dannecker EA, Liu Y, Rector RS, Thomas TR, Fillingim RB & Robinson ME (2012). Sex differences in exercise-induced muscle pain and muscle damage. *J Pain* **13**, 1242–1249.
- Davis JM & Bailey SP (1997). Possible mechanisms of central nervous system fatigue

- during exercise. *Med Sci Sports Exerc* **29**, 45–57.
- Dervis S, Coombs GB, Chaseling GK, Filingeri D, Smoljanic J & Jay O (2016). A comparison of thermoregulatory responses to exercise between mass-matched groups with large differences in body fat. *J Appl Physiol* **120**, 615–623.
- Douzi W, Dupuy O, Theurot D, Smolander J & Dugué B (2020). Per-cooling (Using cooling systems during physical exercise) enhances physical and cognitive performances in hot environments. a narrative review. *Int J Environ Res Public Health* **17**, 1031.
- Druyan A, Makranz C, Moran D, Yanovich R, Epstein Y & Heled Y (2012). Heat tolerance in women-Reconsidering the criteria. *Aviat Sp Environ Med* **83**, 58–60.
- Duffield R (2008). Cooling interventions for the protection and recovery of exercise performance from exercise-induced heat stress. *Med Sport Sci* **53**, 89–103.
- Duffield R & Marino FE (2007). Effects of pre-cooling procedures on intermittent-sprint exercise performance in warm conditions. *Eur J Appl Physiol* **100**, 727–735.
- Epstein Y, Roberts WO, Golan R, Heled Y, Sorkine P & Halpern P (2015). Sepsis, septic shock, and fatal exertional heat stroke. *Curr Sports Med Rep* **14**, 64–69.
- Erlandson T, Cena K, De Dear R & Harvenith G (2003). Environmental and human factors influencing thermal comfort of office occupants in hot - Humid and hot - Arid climates. *Ergonomics* **46**, 616–628.
- Eston R & Peters D (1999). Effects of cold water immersion on the symptoms of exercise-induced muscle damage. *J Sports Sci* **17**, 231–238.
- Febbraio MA, Snow RJ, Stathis CG, Hargreaves M & Carey MF (1994). Effect of heat stress on muscle energy metabolism during exercise. *J Appl Physiol* **77**, 2827–2831.

Flores DF, Gentil P, Brown LE, Pinto RS, Carregaro RL & Bottar M (2011).

Dissociated time course of recovery between genders after resistance exercise. *J Strength Cond Res* **25**, 3039–3044.

Gagge AP, Stolwijk JAJ & Hardy JD (1967). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environ Res* **1**, 1–20.

Gagnon D, Crandall CG & Kenny GP (2013). Sex differences in postsynaptic sweating and cutaneous vasodilation. *J Appl Physiol* **114**, 394–401.

Gagnon D, Dorman LE, Jay O, Hardcastle S & Kenny GP (2009). Core temperature differences between males and females during intermittent exercise: Physical considerations. *Eur J Appl Physiol* **105**, 453–461.

Gagnon D, Jay O, Lemire B & Kenny GP (2008). Sex-related differences in evaporative heat loss: The importance of metabolic heat production. *Eur J Appl Physiol* **104**, 821–829.

Gagnon D & Kenny GP (2011). Sex modulates whole-body sudomotor thermosensitivity during exercise. *J Physiol* **589**, 6205–6217.

Gagnon D & Kenny GP (2012a). Does sex have an independent effect on thermoeffector responses during exercise in the heat? *J Physiol* **590**, 5963–5973.

Gagnon D & Kenny GP (2012b). Sex differences in thermoeffector responses during exercise at fixed requirements for heat loss. *J Appl Physiol* **113**, 746–757.

Golja P, Tipton MJ & Mekjavic IB (2003). Cutaneous thermal thresholds - The reproducibility of their measurements and the effect of gender. *J Therm Biol* **28**, 341–346.

González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T & Nielsen B (1999).

- Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* **86**, 1032–1039.
- Gonzalez AM, Stout JR, Jajtner AR, Townsend JR, Wells AJ, Beyer KS, Boone CH, Pruna GJ, Mangine GT, Scanlon TM, Bohner JD, Oliveira LP, Fragala MS & Hoffman JR (2014). Effects of β -hydroxy- β -methylbutyrate free acid and cold water immersion on post-exercise markers of muscle damage. *Amino Acids* **46**, 1501–1511.
- Hackney AC (2017). *Sex Hormones, Exercise and Women*.
- Hardy JD & Du Bois EF (1940). Differences between men and women in their response to heat and cold. *Proc Natl Acad Sci U S A* **26**, 389–398.
- Hauswirth C, Duffield R, Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Brisswalter J & Castagna O (2012). Postexercise cooling interventions and the effects on exercise-induced heat stress in a temperate environment. *Appl Physiol Nutr Metab* **37**, 965–975.
- Hauswirth C, Louis J, Bieuzen F, Pournot H & Fournier J (2011). Effects of Whole-Body Cryotherapy vs. Far-Infrared vs. Passive Modalities on Recovery from Exercise-Induced Muscle Damage in Highly-Trained Runners. *PLoS One* **6**, 27749.
- Havenith G, Coenen JML, Kistemaker L & Kenney WL (1998). Relevance of individual characteristics for human heat stress response is dependent on exercise intensity and climate type. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* **77**, 231–241.
- Havenith G, Luttikholt VGM & Vrijkotte TGM (1995). The relative influence of body characteristics on humid heat stress response. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* **70**, 270–279.
- Havenith G & Middendorp H (1990). The relative influence of physical fitness, acclimatization state, anthropometric measures and gender on individual

- reactions to heat stress. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* **61**, 419–427.
- Hessemer V, Langusch D, Bruck K, Bödeker RH & Breidenbach T (1984). Effect of slightly lowered body temperatures on endurance performance in humans. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* **57**, 1731–1737.
- Hohenauer E, Taeymans J, Baeyens JP, Clarys P & Clijsen R (2015). The effect of post-exercise cryotherapy on recovery characteristics: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One* **10**, 1–22.
- Hosokawa Y, Adams WM, Belval LN, Vandermark LW & Casa DJ (2017). Tarp-Assisted Cooling as a Method of Whole-Body Cooling in Hyperthermic Individuals. *Ann Emerg Med* **69**, 347–352.
- Howatson G, Goodall S & Someren KA (2009). The influence of cold water immersions on adaptation following a single bout of damaging exercise. *Eur J Appl Physiol* **105**, 615–621.
- Howe AS & Boden BP (2007). Heat-related illness in athletes. *Am J Sports Med* **35**, 1384–1395.
- Ichinose-Kuwahara T, Inoue Y, Iseki Y, Hara S, Ogura Y & Kondo N (2010). Sex differences in the effects of physical training on sweat gland responses during a graded exercise. *Exp Physiol* **95**, 1026–1032.
- Ingram J, Dawson B, Goodman C, Wallman K & Beilby J (2009). Effect of water immersion methods on post-exercise recovery from simulated team sport exercise. *J Sci Med Sport* **12**, 417–421.
- Inoue Y, Tanaka Y, Omori K, Kuwahara T, Ogura Y & Ueda H (2005). Sex- and menstrual cycle-related differences in sweating and cutaneous blood flow in response to passive heat exposure. *Eur J Appl Physiol* **94**, 323–332.

Jacobs I, Romet T, Frim J & Hynes A (1984). Effects of endurance fitness on responses to cold water immersion. *Aviat Sp Environ Med* **55**, 715–720.

Jajtner AR, Hoffman JR, Gonzalez AM, Worts PR, Fragala MS & Stout JR (2015). Comparison of the effects of electrical stimulation and cold-water immersion on muscle soreness after resistance exercise. *J Sport Rehabil* **24**, 99–108.

Jakeman JR, Macrae R & Eston R (2009). A single 10-min bout of cold-water immersion therapy after strenuous plyometric exercise has no beneficial effect on recovery from the symptoms of exercise-induced muscle damage. *Ergonomics* **52**, 456–460.

Janse De Jonge XAK, Thompson MW, Chuter VH, Silk LN & Thom JM (2012). Exercise performance over the menstrual cycle in temperate and hot, humid conditions. *Med Sci Sports Exerc* **44**, 2190–2198.

Jay O, Bain AR, Deren TM, Sacheli M & Cramer MN (2011). Large differences in peak oxygen uptake do not independently alter changes in core temperature and sweating during exercise. *Am J Physiol - Regul Integr Comp Physiol* **301**, 832–841.

Jay O & Morris NB (2018). Does Cold Water or Ice Slurry Ingestion During Exercise Elicit a Net Body Cooling Effect in the Heat? *Sport Med* **48**, 17–29. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs40279-017-0842-8.pdf> [Accessed May 8, 2018].

Jones PR, Barton C, Morrissey D, Maffulli N & Hemmings S (2012). Pre-cooling for endurance exercise performance in the heat: A systematic review. *BMC Med* **10**, 166.

Julien P (2019). *Heat Stress in Sport and Exercise*.

- Kaciuba-Uscilko H & Grucza R (2001). Gender differences in thermoregulation. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* **4**, 533–536.
- Kaikaew K, Van Den Beukel JC, Neggers SJCMM, Themmen APN, Visser JA & Grefhorst A (2018). Sex difference in cold perception and shivering onset upon gradual cold exposure. *J Therm Biol* **77**, 137–144.
- Karjalainen S (2012). Thermal comfort and gender: A literature review. *Indoor Air* **22**, 96–109.
- Kay D, Taaffe DR & Marino FE (1999). Whole-body pre-cooling and heat storage during self-paced cycling performance in warm humid conditions. *J Sports Sci* **17**, 937–944.
- Kazman JB, Purvis DL, Heled Y, Lisman P, Atias D, Van Arsdale S & Deuster PA (2015). Women and exertional heat illness: identification of gender specific risk factors. *US Army Med Dep J* **58–66**.
- Kenny GP & Jay O (2007). Sex differences in postexercise esophageal and muscle tissue temperature response. *Am J Physiol - Regul Integr Comp Physiol* **292**, R1632–R1640.
- Kenny GP & Journey WS (2010). *Human thermoregulation: separating thermal and nonthermal effects on heat loss*.
- Kenny GP & McGinn R (2017). Restoration of thermoregulation after exercise. *J Appl Physiol* **122**, 933–944.
- Kenny GP, Murrin JE, Shane Journey W & Reardon FD (2006). Differences in the postexercise threshold for cutaneous active vasodilation between men and women. *Am J Physiol - Regul Integr Comp Physiol* **290**, 172–179.
- Kenny GP, Périard J, Journey WS, Sigal RJ & Reardon FD (2003). Effect of exercise

- intensity on the postexercise sweating threshold. *J Appl Physiol* **95**, 2355–2360.
- Kerr ZY, Casa DJ, Marshall SW & Comstock RD (2013). Epidemiology of exertional heat illness among U.S. High School Athletes. *Am J Prev Med* **44**, 8–14.
- Kuligowski LA, Lephart SM, Giannantonio FP & Blanc RO (1998). Effect of whirlpool therapy on the signs and symptoms of delayed-onset muscle soreness. *J Athl Train* **33**, 222–228.
- Lan L, Lian Z, Liu W & Liu Y (2008). Investigation of gender difference in thermal comfort for Chinese people. *Eur J Appl Physiol* **102**, 471–480.
- Lee A, Baxter J, Eischer C, Gage M, Hunter S & Yoon T (2017). Sex differences in neuromuscular function after repeated eccentric contractions of the knee extensor muscles. *Eur J Appl Physiol* **117**, 1119–1130.
- Lee DT & Haymes EM (1995). Exercise duration and thermoregulatory responses after whole body precooling. *J Appl Physiol* **79**, 1971–1976.
- Leeder J, Gissane C, van Someren K, Gregson W & Howatson G (2012). Cold water immersion and recovery from strenuous exercise: a meta-analysis. *Br J Sports Med* **46**, 233–240.
- Lemire BB, Gagnon D, Jay O & Kenny GP (2009). Differences between sexes in rectal cooling rates after exercise-induced hyperthermia. *Med Sci Sports Exerc* **41**, 1633–1639.
- Lundgren-Kownacki K, Martínez N, Johansson B, Psikuta A, Annaheim S & Kuklane K (2017). Human responses in heat – comparison of the Predicted Heat Strain and the Fiala multi-node model for a case of intermittent work. *J Therm Biol* **70**, 45–52.
- MacIntyre DL, Reid WD, Lyster DM & McKenzie DC (2000). *Different effects of*

strenuous eccentric exercise on the accumulation of neutrophils in muscle in women and men.

- Marino FE (2002). Methods, advantages, and limitations of body cooling for exercise performance. *Br J Sports Med* **36**, 89–94. Available at: <http://bjsm.bmj.com/> [Accessed August 6, 2019].
- Marquet LA, Hausswirth C, Hays A, Vettoretti F & Brisswalter J (2015). Comparison of between-training-sessions recovery strategies for world-class BMX pilots. *Int J Sports Physiol Perform* **10**, 219–223.
- McArdle WD, Magel JR, Gergley TJ, Spina RJ & Toner MM (1984). Thermal adjustment to cold-water exposure in resting men and women. *Am J Physiol Soc* **56**, 1572–1577.
- McArdle WD, Toner MM, Magel JR, Spina RJ & Pandolf KB (1992). Thermal responses of men and women during cold-water immersion: influence of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* **65**, 265–270.
- Minahan C, Joyce S, Bulmer AC, Cronin N & Sabapathy S (2015). The influence of estradiol on muscle damage and leg strength after intense eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol* **115**, 1493–1500.
- Montgomery PG, Pyne DB, Hopkins WG, Dorman JC, Cook KK & Minahan CL (2008). The effect of recovery strategies on physical performance and cumulative fatigue in competitive basketball. *J Sports Sci* **26**, 1135–1145.
- Morris NB, Coombs G & Jay O (2016). Ice slurry ingestion leads to a lower net heat loss during exercise in the heat. *Med Sci Sports Exerc* **48**, 114–122.
- Morton RH (2007). Contrast water immersion hastens plasma lactate decrease after intense anaerobic exercise. *J Sci Med Sport* **10**, 467–470.

- Mueller F (2003). Keeping your cool. *Coatings Mag* **24**, 69–70.
- Nesser TW, Huxel KC, Tincher JL & Okada T (2008). The relationship between core stability and performance in division i football players. *Ed Cowan Univ Res Online* **22**, 1750–1754.
- Nie HL, Arendt-Nielsen L, Kawczynski A & Madeleine P (2007). Gender effects on trapezius surface EMG during delayed onset muscle soreness due to eccentric shoulder exercise. *J Electromyogr Kinesiol* **17**, 401–409.
- Niwa KI, Nakai SI, Asayama M, Hirata K, Hanawa KI, Igawa S, Hirashita M, Sugahara M & Itou S (1996). A survey of ambient temperature, drinking, sweating and body temperature. *Japanese J Phys Fit Sport Med* **45**, 151–158.
- Olschewski H & Bruck K (1988). Thermoregulatory, cardiovascular, and muscular factors related to exercise after precooling. *J Appl Physiol* **64**, 803–811.
- De Pauw K, Roelands B, Vanparijs J & Meeusen R (2014). Effect of Recovery Interventions on Cycling Performance and Pacing Strategy in the Heat. *Int J Sports Physiol Perform* **9**, 240–248.
- Peake JM, Roberts LA, Figueiredo VC, Egner I, Krog S, Aas SN, Suzuki K, Markworth JF, Coombes JS, Cameron-Smith D & Raastad T (2017). The effects of cold water immersion and active recovery on inflammation and cell stress responses in human skeletal muscle after resistance exercise. *J Physiol* **595**, 695–711.
- Peiffer JJ, Abbiss CR, Nosaka K, Peake JM & Laursen PB (2009). Effect of cold water immersion after exercise in the heat on muscle function, body temperatures, and vessel diameter. *J Sci Med Sport* **12**, 91–96.
- Périard JD, Racinais S, Timpka T, Dahlström Ö, Spreco A, Jacobsson J, Bargoria V, Halje K & Alonso JM (2017). Strategies and factors associated with preparing for

- competing in the heat: A cohort study at the 2015 IAAF World Athletics Championships. *Br J Sports Med* **51**, 264–271.
- Pointon M & Duffield R (2012). Cold water immersion recovery after simulated collision sport exercise. *Med Sci Sports Exerc* **44**, 206–216.
- Pointon M, Duffield R, Cannon J & Marino FE (2012). Cold water immersion recovery following intermittent-sprint exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* **112**, 2483–2494.
- Pournot H, Bieuzen F, Duffield R, Lepretre PM, Cozzolino C & Hausswirth C (2011a). Short term effects of various water immersions on recovery from exhaustive intermittent exercise. *Eur J Appl Physiol* **111**, 1287–1295.
- Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Fillard J-R & Barbiche E (2011b). Time-Course of Changes in Inflammatory Response after Whole-Body Cryotherapy Multi Exposures following Severe Exercise. *PLoS One* **6**, 22748.
- Proulx CI, Ducharme MB & Kenny GP (2003). Effect of water temperature on cooling efficiency during hyperthermia in humans. *J Appl Physiol* **94**, 1317–1323.
- Quod MJ, Martin DT & Laursen PB (2006). Cooling athletes before competition in the heat: Comparison of techniques and practical considerations. *Sport Med* **36**, 671–682.
- Quod MJ, Martin DT, Laursen PB, Gardner AS, Halson SL, Marino FE, Tate MP, Mainwaring DE, Gore CJ & Hahn AG (2008). Practical precooling: Effect on cycling time trial performance in warm conditions. *J Sports Sci* **26**, 1477–1487.
- Rae DE, Knobel GJ, Mann T, Swart J, Tucker R & Noakes TD (2008). Heatstroke during endurance exercise: Is there evidence for excessive endothermy? *Med Sci Sports Exerc* **40**, 1193–1204.

- Ramanathan NL (1964). A New Weighting System for Mean Surface Temperature of the Human Body. *J Appl Physiol* **19**, 531–533.
- Roberts LA, Nosaka K, Coombes JS & Peake JM (2014). Cold water immersion enhances recovery of submaximal muscle function after resistance exercise. *Am J Physiol - Regul Integr Comp Physiol* **307**, R998–R1008.
- Roberts LA, Raastad T, Markworth JF, Figueiredo VC, Egnér IM, Shield A, Cameron-Smith D, Coombes JS & Peake JM (2015). Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training. *J Physiol* **593**, 4285–4301.
- Rodríguez MÁ, Piedra JV, Sánchez-Fernández M, Del Valle M, Crespo I & Olmedillas H (2020). A matter of degrees: A systematic review of the ergogenic effect of pre-cooling in highly trained athletes. *Int J Environ Res Public Health* **17**, 1–15.
- Ross MLR, Garvican LA, Jeacocke NA, Laursen PB, Abbiss CR, Martin DT & Burke LM (2011). Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Med Sci Sports Exerc* **43**, 123–133.
- Ross MLR, Jeacocke NA, Laursen PB, Martin DT, Abbiss CR & Burke LM (2012). Effects of lowering body temperature via hyperhydration, with and without glycerol ingestion and practical precooling on cycling time trial performance in hot and humid conditions. *J Int Soc Sports Nutr* **9**, 55.
- Rowell GJ, Coutts AJ, Reaburn P & Hill-Haas S (2009). Effects of cold-water immersion on physical performance between successive matches in high-performance junior male soccer players. *J Sports Sci* **27**, 565–573.
- Rupp KA, Selkow NM, Parente WR, Ingersoll CD, Weltman AL & Saliba SA (2012). The effect of cold water immersion on 48-hour performance testing in collegiate

- soccer players. *J Strength Cond Res* **26**, 2043–2050.
- Russell M, Sparkes W, Northeast J, Cook CJ, Bracken RM & Kilduff LP (2016). Relationships between match activities and peak power output and creatine kinase responses to professional reserve team soccer match-play. *Hum Mov Sci* **45**, 96–101.
- Sakurada S & Hales JRS (1998). A role for gastrointestinal endotoxins in enhancement of heat tolerance by physical fitness. *J Appl Physiol* **84**, 207–214.
- Schmidt V & Bruck K (1981). Effect of a precooling maneuver on body temperature and exercise performance. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* **50**, 772–778.
- Schulze E, Daanen HAM, Levels K, Casadio JR, Plews DJ, Kilding AE, Siegel R & Laursen PB (2015). Effect of thermal state and thermal comfort on cycling performance in the heat. *Int J Sports Physiol Perform* **10**, 655–663.
- Shapiro Y, Pandolf KB, Avellini BA, Pimental NA & Goldman RF (1981). Heat balance and transfer in men and women exercising in hot-dry and hot-wet conditions. *Ergonomics* **24**, 375–386.
- Siegel R, Maté J, Brearley MB, Watson G, Nosaka K & Laursen PB (2010). Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat. *Med Sci Sports Exerc* **42**, 717–725.
- Siegel R, Maté J, Watson G, Nosaka K & Laursen PB (2011). The influence of ice slurry ingestion on maximal voluntary contraction following exercise-induced hyperthermia. *Eur J Appl Physiol* **111**, 2517–2524.
- Siegel R, Maté J, Watson G, Nosaka K & Laursen PB (2012). Pre-cooling with ice slurry ingestion leads to similar run times to exhaustion in the heat as cold water immersion. *J Sports Sci* **30**, 155–165.

- Smith DL, Fehling PC, Hultquist EM, Arena L, Lefferts WK, Haller JM, Storer TW & Cooper CB (2013). The effect of precooling on cardiovascular and metabolic strain during incremental exercise. *Appl Physiol Nutr Metab* **38**, 935–940.
- Smith JE (2005). Cooling methods used in the treatment of exertional heat illness. *Br J Sports Med* **39**, 503–507.
- Solianik R, Skurvydas A, Pukenas K & Brazaitis M (2015). Comparison of the effects of whole-body cooling during fatiguing exercise in males and females. *Cryobiology* **71**, 112–118.
- Solianik R, Skurvydas A, Vitkauskienė A & Brazaitis M (2014). Gender-specific cold responses induce a similar body-cooling rate but different neuroendocrine and immune responses. *Cryobiology* **69**, 26–33.
- Šrámek P, Šimečková M, Janský L, Šavlíková J & Vybíral S (2000). Human physiological responses to immersion into water of different temperatures. *Eur J Appl Physiol* **81**, 436–442.
- Stanley J, Leveritt M & Peake JM (2010). Thermoregulatory responses to ice-slush beverage ingestion and exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* **110**, 1163–1173.
- Stanley J, Peake JM & Buchheit M (2013). Consecutive days of cold water immersion: Effects on cycling performance and heart rate variability. *Eur J Appl Physiol* **113**, 371–384.
- Staron RS, Hikida RS, Murray TF, Nelson MM, Johnson P & Hagerman F (1992). Assessment of skeletal muscle damage in successive biopsies from strength-trained and untrained men and women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* **65**, 258–264.
- Stephens JM, Argus C & Driller MW (2014). The relationship between body

- composition and thermal responses to hot and cold water immersion. *J Hum Perform Extrem Environ* **11**, 1–9.
- Stephens JM, Halson S, Miller J, Slater GJ & Askew CD (2017). Cold water immersion for athletic recovery: one size does not fit all. *Int J Sports Physiol Perform* **12**, 2–9.
- Stephens JM, Halson SL, Miller J, Slater GJ & Askew CD (2018). Influence of body composition on physiological responses to post-exercise hydrotherapy. *J Sports Sci* **36**, 1044–1053.
- Stevens CJ, Dascombe B, Boyko A, Sculley D & Callister R (2013). Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat. *J Sports Sci* **31**, 1271–1279.
- Stevens CJ, Mauger AR, Hassmèn P & Taylor L (2018). Endurance Performance is Influenced by Perceptions of Pain and Temperature: Theory, Applications and Safety Considerations. *Sport Med* **48**, 525–537.
- Stupka N, Lowther S, Chorneyko K, Bourgeois JM, Hogben C & Tarnopolsky MA (2000). Gender differences in muscle inflammation after eccentric exercise. *J Appl Physiol* **89**, 2325–2332.
- Stupka N, Tarnopolsky MA, Yardley NJ & Phillips SM (2001). Cellular adaptation to repeated eccentric exercise-induced muscle damage. *J Appl Physiol* **91**, 1669–1678.
- Sugenoya J & Ogawa T (1985). *Characteristics of Central Sudomotor Mechanism Estimated by Frequency of Sweat Expulsions*. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjphysiol1950/35/5/35_5_783/_pdf.
- Takatsu S, Yamasaki M & Hasegawa H (2008). The gender differences in thermoregulatory responses during exercise recovery. *Japanese J Phys Fit Sport*

Med **57**, 295–304.

Tan PMS & Lee JKW (2015). The role of fluid temperature and form on endurance performance in the heat. *Scand J Med Sci Sport* **25**, 39–51.

Toner MM, Sawka MN, Foley ME & Pandolf KB (1986). Effects of body mass and morphology on thermal responses in water. *J Appl Physiol* **60**, 521–525.

Vaile J, Halson S, Gill N & Dawson B (2008a). Effect of cold water immersion on repeat cycling performance and thermoregulation in the heat. *J Sports Sci* **26**, 431–440.

Vaile J, Halson S, Gill N & Dawson B (2008b). Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *Eur J Appl Physiol* **102**, 447–455.

Vaile J, O'Hagan C, Stefanovic B, Walker M, Gill N & Askew CD (2011). Effect of cold water immersion on repeated cycling performance and limb blood flow. *Br J Sports Med* **45**, 825–829.

Vargas NT, Chapman CL, Sackett JR, Johnson BD, Gathercole R & Schlader ZJ (2019). Thermal Behavior Differs between Males and Females during Exercise and Recovery. *Med Sci Sports Exerc* **51**, 141–152.

Walker A, Driller M, Brearley M & Argus C (2014). Cold-water immersion and iced-slush ingestion are effective at cooling firefighters following a simulated search and rescue task in a hot environment. *Appl Physiol Nutr Metab* **39**, 1159–1166.

Wang Z, de Dear R, Luo M, Lin B, He Y, Ghahramani A & Zhu Y (2018). Individual difference in thermal comfort: A literature review. *Build Environ* **138**, 181–193.

Warren GL, Lowe DA & Armstrong RB (1999). Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sport Med* **27**, 43–59.

White GE, Rhind SG & Wells GD (2014). The effect of various cold-water immersion protocols on exercise-induced inflammatory response and functional recovery from

high-intensity sprint exercise. *Eur J Appl Physiol* **114**, 2353–2367.

Yeo ZW, Fan PWP, Nio AQX, Byrne C & Lee JKW (2012). Ice slurry on outdoor running performance in heat. *Int J Sports Med* **33**, 859–866.

Zimmermann MR & Landers GJ (2015). The effect of ice ingestion on female athletes performing intermittent exercise in hot conditions. *Eur J Sport Sci* **15**, 407–413.

Zimmermann MR, Landers GJ & Wallman KE (2017). Crushed ice ingestion does not improve female cycling time trial performance in the heat. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **27**, 67–75.

井上芳光 & 近藤徳彦 (2010). 体温 II 体温調節システムとその適応.

謝辞

本博士論文は、筆者が早稲田大学スポーツ科学研究科修士課程および博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。本実験を遂行するにあたり、ご指導、ご支援いただきました皆様に心より感謝申し上げます。

本論文を執筆するにあたり、本研究科の村岡功教授には指導教員として、ご懇篤なる御指導ならびに御校閲を賜り、深甚なる感謝の意を表します。一度研究室を離れた私に、最後まで丁寧に指導いただきましたことは、感謝の念に堪えません。村岡先生のおかげで、最後まで諦めずに、研究と向き合い、博士論文の完成を迎えることができました。

本研究科の坂本静男教授、鈴木克彦教授には、博士論文の副査を快く引き受けてくださり、貴重なご意見を賜りましたこと、ここに感謝の意を表します。また、実験 3 ではお忙しい中実験にご協力いただきましたこと心より御礼申し上げます。

村岡研究室の河村拓史助教には、実験の立ち上げから学术论文の書き方まで、研究者の先輩として、また研究室の先生として、細かいところまでご指導、ご支援いただきましたこと心より感謝致します。河村先生のサポートなしでは、実験の遂行、論文の執筆、博士論文の完成には至りませんでした。

また、村岡研究室のメンバーには、実験への協力や、勉強会での貴重なご意見をいただきましたこと、ここに改めて感謝の意を表します。

実験に参加してくださった多くの方々には、過酷な実験条件下にも関わらず、快くご協力いただきましたこと感謝申し上げます。

本研究科の細川由梨講師には、実験 1 および 2 の遂行にあたり、専門的な観点から、実験プロトコルや論文執筆に関する貴重なご助言を賜りましたこと厚く御礼申し上げます。

静岡大学教育学部杉山康司教授には、学部生時代に実験の進め方を教えていただき、研究へ進むきっかけを与えていただきました。卒業してからも、温かく見守り、時にはご助言いただきましたこと、心より感謝申し上げます。

最後に、長きに亘る学生生活を理解し、支えてくれた両親、家族に感謝の意を表します。