

個人差を考慮した熱中症予防法の検証

ー身体内部冷却を用いた身体冷却は、体格の大きい集団に効果的か？ー

研究代表者 柳岡 拓磨（健康スポーツ系コース）

研究分担者 長谷川 博（総合科学部）

I 研究の背景と目的

近年の地球温暖化に伴って、暑熱環境下で運動を行う機会が増加している。通常環境下と比較し、暑熱環境下では運動によって深部体温や皮膚温が過度に上昇する。深部体温の過度な上昇は、心血管系、エネルギー代謝系、主観的ストレスの上昇に関連し、熱中症を引き起こす主要因となる(Sawka, Leon, Montain, & Sonna, 2011)。また、ヒトの体温調節反応には体格に基づく個人差があることが知られており、体表面積と体重の比 (A_D -to-mass ratio) が小さいヒト（すなわち、体格が大きいヒト）は、 A_D -to-mass ratio が大きいヒト（体格が小さいヒト）と比較し、環境温が皮膚温を上回らない暑熱環境下において（環境温が35°C程度以下）、運動中に深部体温が上昇しやすい(Cramer & Jay, 2016)。したがって、暑熱環境下で深部体温が上昇しやすく、熱中症のリスクが高い A_D -to-mass ratio の小さい集団向けの暑さ対策を検討することが求められる。

身体冷却は実用性が高く、実際にスポーツ現場で用いられている暑さ対策として知られている(Périard et al., 2017)。身体冷却の方法は、バスタブなどを用いた冷水浴やクーリングベストなどを用いて身体の外側から冷却する外部冷却と冷たい飲料などの摂取により身体の内側から冷却する内部冷却に大きく分けることができる。我々は、球技系競技のハーフタイムなどに代表される運動間の休息中に、身体外部冷却と身体内部冷却を組み合わせた身体混合冷却を用いることで、より効率の高い暑さ対策を講じることができることを示してきた。例えば、暑熱環境下における30分間、2セットの自転車運動間の15分の休息中に、クーリングベストの着用と体重あたり5.0 gのアイススラリー（氷と液体が混合したシャーベット飲料）の摂取を行うことで、2セット目の運動中の深部体温と運動パフォーマンスを改善させることを報告した(柳岡ら 2020)。Onitsuka らは、アイススラリーを単独で摂取した場合、摂取直後の運動中の深部体温上昇率が上昇することを報告しているが(Onitsuka, Ueno, Zheng, & Hasegawa, 2015)、我々の研究はクーリングベストの着用を組み合わせることで2セット目の運動中、継続的に深部体温を低下させることを明らかにした点において、先行研究と比較し、優れている(柳岡ら 2020)。しかし、我々の報告も含め、 A_D -to-mass ratio の小さい集団に効果が高く、実用的な身体冷却を検討した先行研究は散見されない。唯一、体格と身体冷却効果の関係を検討されている身体冷却方法は冷水浴であるが(Godek, Morrison, & Scullin, 2017)、冷水浴は大量の水や氷、浴槽の手配が必要であり、スポーツ現場で実用性が低いという問題点を有している。

前述した体格と冷水浴の身体冷却効果の関係を調査した先行研究によると、冷水浴による1分間あたり深部体温低下率は、 A_D -to-mass ratio の大きい集団と比較し、 A_D -to-mass ratio の小さい集団で低い(Godek et al., 2017)。これは、ヒトの熱放散機能に重要な役割を持つ体表面積が、熱産生に重要な役割を持つ体重に対して小さいため、冷水と身体との熱交換効

率が相対的に低くなることに起因する(Cramer & Jay, 2016)。すなわち、 A_D -to-mass ratio の小さい集団に対して、身体外部冷却による深部体温低下効果は低い可能性がある。一方で、身体内部冷却の深部体温低下効果は冷飲料の摂取量に依存するため(Ross et al., 2011), 先行研究で広く用いられている体重で規定された冷飲料の摂取を行うと、 A_D -to-mass ratio の小さい集団（すなわち、体重が大きい集団）では、冷飲料の摂取量が大きく、深部体温をより大きく低下させることができる可能性がある。さらに、身体内部冷却の深部体温低下効果を冷飲料摂取後に長時間継続させるためには、我々が示した通り(柳岡ら 2020), 身体外部冷却と併用する必要がある。

したがって、本研究の目的は、暑熱環境下における運動間の休息中に行う身体混合冷却の深部体温、運動パフォーマンス改善効果が、 A_D -to-mass ratio の大きい集団と比較し、 A_D -to-mass ratio の小さい集団に効果が高いか検討することとした。我々は、身体混合冷却の深部体温、運動パフォーマンス改善効果は A_D -to-mass ratio の小さい集団で高いと仮説を立てた。

(柳岡拓磨*・長谷川博)

II 方法

1. 被験者

本研究の被験者は、運動習慣のある若年男性 15 名とし、身体特性は表 1 に示した。本研究は、広島大学大学院総合科学研究科の倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号 01-27)。全ての被験者に対して実験の目的と内容について説明し、本人の自由な意思のもと、書面による研究参加への同意を得た。実験は暑熱順化による影響を考慮し、夏季の実施は控えた。

2. 研究デザイン

被験者は、最大酸素摂取量 (VO_{2max}) の測定のための漸増運動負荷試験(来研 1)と繰り返し効果を排除するための練習試技(来研 2)の後、無作為化交差試験法を用いた 2 試行の本試験(来研 3・4)を行った。すべての試験は 1 週間以上の間隔をあけて行い、本試験は日内変動の影響を排除するため、同じ時間帯に行った。被験者は、各試験の 24 時間前からカフェインおよびアルコールの摂取を禁止され、3 時間前より水以外の飲食を控えた。また、各試験の 24 時間前から疲労困憊に至る激しい運動を禁止された。

3. 漸増運動負荷試験と練習試技

漸増運動負荷試験は、通常環境(室温 20°C, 相対湿度 50%)に設定した人工気象室(富士医科産業株式会社製, FLC-23S)にて自転車エルゴメーター(コナミスポーツ社製, POWERMAX-V3 PRO)を用いて行われた。運動負荷は 100 W から開始し、被験者が疲労困憊に至るまで 1 分間あたり 20 W ずつ増加させた。呼気ガス代謝分析器(ミナト医科学社製, AE 310S)を用いて、酸素摂取量を測定した。

練習試技は、暑熱環境(室温 35°C, 相対湿度 50%)に設定した人工気象室にて行われた。被験者は、以下に示すコントロール試行と同様の運動を実施した。

4. 本試験の運動プロトコル

本試験では、被験者は最初に暑熱環境（室温 35°C，相対湿度 50%）に設定した人工気象室に入室し，20 分の安静を保った。その後，ウォーミングアップとして 3 分間・40% VO_{2max} の強度の自転車運動を行った。ウォーミングアップ終了後，被験者は，30 分間の自転車運動を 15 分間の休息を挟み，2 回（前半および後半）行った。30 分間の自転車運動は，25 分間の定常負荷運動と 5 分間のタイムトライアルから構成された。定常負荷運動の強度は 55% VO_{2max} とし，被験者は 60 回転/分の自転車運動を維持するように指示された。5 分間のタイムトライアルでは，被験者は最大努力で自転車運動を行うことを指示された。前半および後半の 15 分経過時に体重当たり 2.5 g の室温の水を摂取し，それ以外の水分摂取は認められなかった。

5. 冷却介入

15 分間の運動間の休息中に，被験者は，コントロール試行（CON：体重あたり 5.0 g の室温の飲料摂取），または冷却試行（COOL：クーリングベスト [ミズノ社製，クーリングベスト] 着用および体重あたり 5.0 g のアイススラリー摂取）のいずれかに，ランダムに割り付けられた。アイススラリーは，市販のスポーツドリンク（大塚製薬社製，ポカリスエット）を用いて，作成された。アイススラリー摂取速度を統一するため，7.5 分ごとに体重あたり 2.5 g のアイススラリーを摂取させた。CON 試行で用いた室温の飲料は，アイススラリー作成で用いたスポーツドリンクと同一であった。クーリングベストは，前半の運動直後に着用させた。クーリングベストの着衣および脱衣に時間を要する為，実際の着用時間は 14 分間であった。本研究で用いたクーリングベストは，クーリングベスト内のポケットに約 -1 °C に凍結したアイスパックを挿入することによって，頸部および体幹部を冷却可能であった。

6. 測定項目

身体特性に関する項目として，年齢，身長，体重，骨格筋量，体脂肪率を測定した。体重，骨格筋量，体脂肪率は，生体電気インピーダンス分析機（InBody Japan 社製，InBody470）を用いて測定した。体表面積は，先行研究に基づき（Du Bois & Du Bois, 1916），算出した（体表面積 = 体重[kg]^{0.425} × 身長[cm]^{0.725} × 0.007184）。また， A_D -to-mass ratio は，体表面積を体重で除することによって，算出した。

体温に関する項目として，直腸温，皮膚温，大腿部深部温を測定した。直腸温は，直腸温度計（日機装サーモ社製，LT-ST08-21）を肛門括約筋から約 10cm 挿入し，1 分ごとに測定した。胸部・上腕部・大腿部の皮膚温は，サーミスタープローブ（日機装サーモ社製，LT-ST08-12）を用いて，1 分ごとに測定した。平均皮膚温は，先行研究に基づき（Roberts, Wenger, Stolwijk, & Nadel, 1977），算出した（平均皮膚温 = 0.43 × 胸部 + 0.25 × 上腕部 + 0.32 × 大腿部）。大腿部深部温は，深部体温計（テルモ社製，CM-210）を用いて，1 分ごとに測定した。本研究では，熱流補償法を用いて皮膚から 5-10mm の組織の温度を測定した（Yamakage & Namiki, 2003）。

心血管系項目として，心拍数および上腕部の皮膚血流量を測定した。心拍数は，心拍計（ポラール社製，V800）を用いて 1 分ごとに測定した。上腕部の皮膚血流量は，レーザー

ドップラー血流計（アドバンス社製，ALF21）を用いて，15 分間の休息中に 1 分ごとに測定した。前半の運動終了直後を 100% とし，相対値を算出した。

主観的項目として，熱感覚，熱快適感，主観的運動強度（RPE）を測定した。熱感覚および熱快適感は，13 ポイントのスケール（熱感覚：-6 とても寒い，6 とても暑い，熱快適性：-6 とても不快，6 とても快適）を用いて，5 分ごとに測定した(Olesen & Brager, 2004)。RPE は，15 ポイントのボルグスケールを用いて，前半および後半中の 5 分ごとに測定した(Borg, 1982)。

運動パフォーマンスとして，前半および後半のタイムトライアル中の平均パワー出力を測定した。

7. 統計解析

運動間の休息中に行う身体混合冷却の深部体温，運動パフォーマンス改善効果の体格差を検討するために，15 名の被験者を A_D -to-mass ratio の中央値で 2 つのグループに分類し（High グループ：8 名，Low グループ：7 名），統計解析を行った。統計解析は，統計解析ソフトウェア（SPSS ジャパン社製，SPSS Version 26.0）を用いて行われた。統計的有意水準は 5%未満とし，全ての値は平均±標準偏差で示した。各グループ間の身体特性の比較には，対応のない t 検定を用いた。体温に関する項目，心血管系項目，主観的項目には，三要因の分散分析（対応有：試行，時間，対応無：グループ）を用いた。二次交互作用もしくは一次交互作用が認められた場合，Bonferroni 法を用い，その後の検定を行った。

（柳岡拓磨*・長谷川博）

III 結果

1. 身体特性

各グループの身体特性を表 1 に示した。体重，骨格筋量，体表面積， A_D -to-mass ratio に関して，グループ間の有意な差が認められた。

表 1. 各グループの身体特性

	High グループ (n=8)			Low グループ (n=7)			p 値
年齢(歳)	20.6	±	1.9	21.9	±	2.5	0.31
身長(m)	1.69	±	0.06	1.74	±	0.06	0.10
体重(kg)	59.3	±	6.9	72.8	±	7.0	0.00
骨格筋量(kg)	28.8	±	3.4	34.7	±	3.3	0.04
体脂肪率(%)	13.4	±	2.1	16.4	±	4.0	0.08
体表面積(m ²)	1.68	±	0.12	1.88	±	0.12	0.01
A_D -to-mass ratio(cm ² ·kg ⁻¹)	2.85	±	0.14	2.58	±	0.10	0.00
VO _{2max} (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	53.2	±	9.0	52.9	±	8.2	0.96

平均値±標準偏差

A_D -to-mass ratio：体表面積と体重の比，VO_{2max}：最大酸素摂取量

2. 体温

各グループの直腸温、平均皮膚温の経時的な変化を図 1 A, B に示した。直腸温、平均皮膚温ともに、二次交互作用が認められた ($p<0.05$)。直腸温に関して、Low グループにおいて、COOL 試行は CON 試行と比較し、40 分から 75 分まで有意な低下が認められた ($p<0.05$)。一方で、High グループでは、COOL 試行による有意な低下は認められなかった。平均皮膚温に関して、Low グループにおいて、COOL 試行は CON 試行と比較し、35 分から 50 分まで有意な低下が認められた ($p<0.05$)。一方で、High グループでは、COOL 試行による平均皮膚温の有意な低下は、40 分から 45 分までのみであった ($p<0.05$)。大腿部深部温に関して、二次交互作用は認められなかったが、試行と時間の一次交互作用が認められた ($p<0.05$)。COOL 試行は、CON 試行と比較し、35 分から 75 分まで有意な低値を示した ($p<0.05$)。

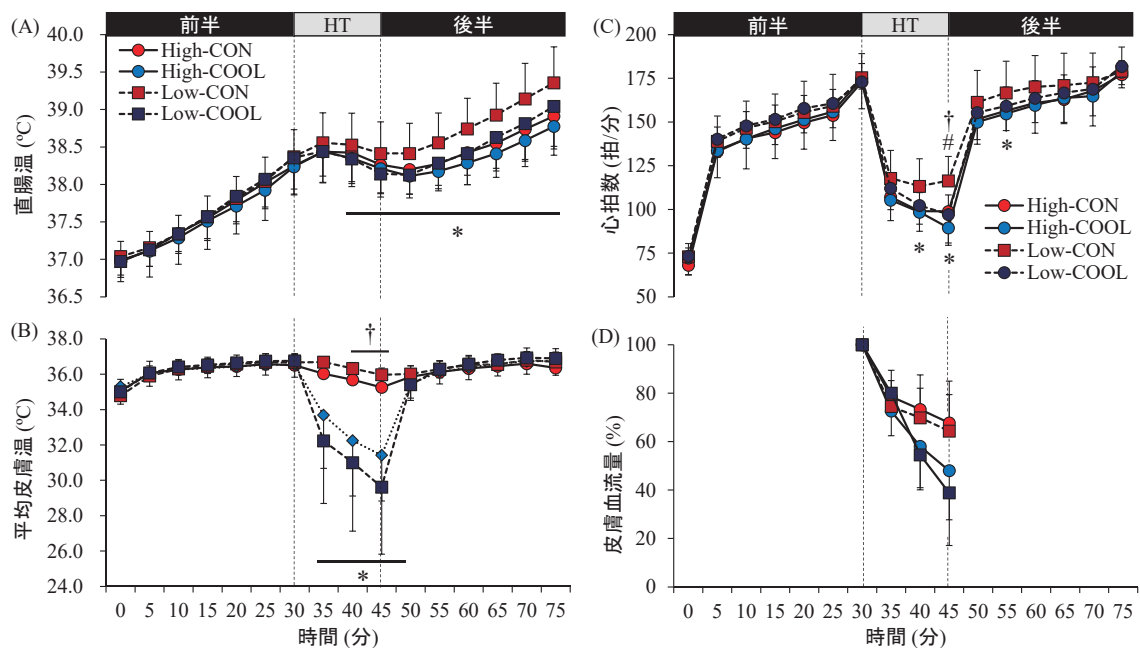


図 1. 直腸温 (A), 平均皮膚温 (B), 心拍数 (C) および皮膚血流量 (D) の経時的変化

平均値±標準偏差 (High グループ : $n=8$, Low グループ : $n=7$), HT : 運動間の休息

* Low グループにおける試行間の有意な差 ($p<0.05$)

† High グループにおける試行間の有意な差 ($p<0.05$)

CON 試行におけるグループ間の有意な差 ($p<0.05$)

3. 心血管系項目

各グループの心拍数、皮膚血流量の経時的な変化を図 1 C, D に示した。心拍数のみ、二次交互作用が認められた ($p<0.05$)。心拍数に関して、Low グループにおいて、COOL 試行は CON 試行と比較し、40, 45, 55 分で有意な減少が認められた ($p<0.05$)。一方で、High グループでは、COOL 試行による有意な減少は 45 分のみであった ($p<0.05$)。さらに、CON 試行内での比較では、Low グループは、High グループと比較し、45 分の心拍数が有意な

高値を示した ($p<0.05$)。皮膚血流量では二次交互作用が認められなかったが、試行と時間の一次交互作用が認められた ($p<0.05$)。COOL 試行は、CON 試行と比較し、40、45 分で有意な低値を示した。

4. 主観的項目

熱感覚、熱快適感、RPE に関して、二次交互作用は認められなかったが、試行と時間の一次交互作用が認められた ($p<0.05$)。熱感覚において、COOL 試行は、CON 試行と比較し、35 分から 75 分まで有意な改善が認められた ($p<0.05$)。熱快適性において、COOL 試行は、CON 試行と比較し、35 分から 65 分までおよび 75 分で有意な改善が認められた ($p<0.05$)。RPE において、COOL 試行は、CON 試行と比較し、50 分から 70 分まで有意な改善が認められた ($p<0.05$)。

5. 運動パフォーマンス

各グループのタイムトライアルの平均パワー出力の変化を図 2 に示した。二次交互作用が認められた ($p<0.05$)。Low グループの後半の平均パワー出力は、COOL 試行において、CON 試行と比較し、有意な高値を示した ($p<0.05$)。一方、High グループでは、平均パワー出力の改善は認められなかった。

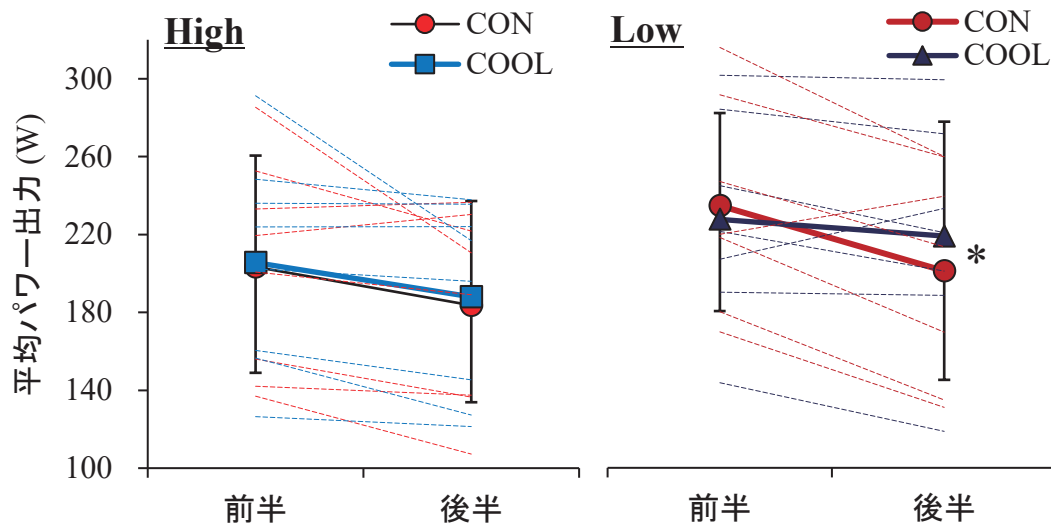


図 2. タイムトライアル中の平均パワー出力

平均値±標準偏差 (High グループ : $n=8$, Low グループ : $n=7$)

実線は平均値の変化を示し、点線は各被験者の変化を示している。

* Low グループにおける試行間の有意な差 ($p<0.05$)

(柳岡拓磨*・長谷川博)

IV 研究の成果と今後の課題

本研究では、暑熱環境下における身体混合冷却の深部体温、運動パフォーマンス改善効果が、 A_D -to-mass ratio の大きい集団と比較し、 A_D -to-mass ratio の小さい集団で効果が高いか検討した。本研究の主な知見は、運動間の休息中におけるクーリングベストの着用と体

重あたり 5.0 g のアイススラリーの摂取は、1) Low グループでのみ、深部体温を低下させた、2) Low グループでより素早く、かつ、より長く心拍数を減少させた、3) Low グループでのみ、運動パフォーマンスを改善したことであった。これらの知見は、我々の研究仮説を支持するものであった。また、グループ間の効果の差異は認められなかったものの、身体混合冷却によって、皮膚血流量と主観的項目が改善したことは、我々の先行研究と一致している(柳岡ら 2020)。従って、本研究で用いた身体混合冷却は、体温、心血管系項目の改善に関して、体格が大きいグループでより大きいことが明らかとなった。

我々の知る限り、本研究は、実用性の高い身体混合冷却を用いた深部体温低下効果に体格差があることを示した初めての研究である。クーリングベストの単独での着用は深部体温を低下させないが(Chaen, Onitsuka, & Hasegawa, 2019), アイススラリーの単独摂取は深部体温を低下させる(Onitsuka et al., 2015)という先行研究を踏まえると、本研究の Low グループでの深部体温低下は、アイススラリーの摂取が主に貢献していると考えられる。さらに深部体温の低下が Low グループでのみ観察された理由として、アイススラリーの摂取量のグループ間の差が考えられる。アイススラリーの深部体温低下効果には量依存の関係があり(Ross et al., 2011), 本研究では Low グループの体重は High グループの体重より有意に大きく、Low グループでアイススラリーの摂取量が大きかった。したがって、このようなアイススラリー摂取量のグループ間の差に基づいて、身体混合冷却を用いた深部体温低下効果に体格差が認められた可能性がある。

暑熱環境下における持久的運動パフォーマンスの低下は、 VO_{2max} の低下とそれに伴う相対的運動強度の上昇によって引き起こされる(Cheuvront, Kenefick, Montain, & Sawka, 2010)。暑熱環境下で運動を行うと、熱放散機能を向上させるために皮膚血流量が増加する(Stevens, Taylor, & Dascombe, 2017)。皮膚血液量の増加と深部体温上昇に基づく内因性の心拍数の増加によって(Chou, Allen, Hahn, Leary, & Coyle, 2018), 心拍出量と筋への酸素供給量が低下し、 VO_{2max} が減少する。本研究では、前述のメカニズムによって Low グループでのみ深部体温が低下し、その結果として、Low グループにおける内因性の心拍数の増加が抑制され、心拍数が減少した可能性がある。そして、Low グループにおけるこれらの心血管系の負荷の低下が運動パフォーマンスの改善に繋がったと考えられる。

今後の課題として、本研究で用いた被験者よりも体格の大きい被験者のリクルートを行う必要がある。本研究での Low グループの A_D -to-mass ratio は 2.58 程度であったが、アメリカンフットボール選手は 2.00 程度である(Godek et al., 2017)。より熱中症リスクの高い集団に対し、効果的な熱中症予防対策を検討する必要がある。

結論として、運動間の休息中におけるクーリングベストの着用と体重あたり 5.0 g のアイススラリーの摂取は、体格が大きい集団に対し、深部体温の低下、心血管系負荷の軽減、運動パフォーマンスの改善に効果的であることが明らかとなった。

(柳岡拓磨*・長谷川博)

引用文献

- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(5), 377–381.
- Chaen, Y., Onitsuka, S., & Hasegawa, H. (2019). Wearing a cooling vest during half-time improves

- intermittent exercise in the heat. *Frontiers in Physiology*, 10, 711.
- Cheuvront, S. N., Kenefick, R. W., Montain, S. J., & Sawka, M. N. (2010). Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *Journal of Applied Physiology*, 109(6), 1989–1995.
- Chou, T. H., Allen, J. R., Hahn, D., Leary, B. K., & Coyle, E. F. (2018). Cardiovascular responses to exercise when increasing skin temperature with narrowing of the core-to-skin temperature gradient. *Journal of Applied Physiology*, 125(3), 697–705.
- Cramer, M. N., & Jay, O. (2016). Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 196, 3–13.
- Du Bois, D., & Du Bois, E. F. (1916). A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Int Med*, 17, 863–871.
- Godek, S. F., Morrison, K. E., & Scullin, G. (2017). Cold-water immersion cooling rates in football linemen and cross-country runners with exercise-induced hyperthermia. *Journal of Athletic Training*, 52(10), 902–909.
- Olesen, B. W., & Brager, G. S. (2004). A better way to predict comfort: the new ASHRAE standard 55-2004. *ASHRAE Journal*, 8, 20–26.
- Onitsuka, S., Ueno, T., Zheng, X., & Hasegawa, H. (2015). Effect of ice slurry ingestion during half-time breaks on intermittent exercise capacity and thermoregulation in the warm environment. *Gazzetta Medica Italiana Archivio per Le Scienze Mediche*, 174(3), 113–121.
- Périard, J. D., Racinais, S., Timpka, T., Dahlström, Ö., Spreco, A., Jacobsson, J., Bargaría, V., Halje, K., Alonso, J. M. (2017). Strategies and factors associated with preparing for competing in the heat: A cohort study at the 2015 IAAF World Athletics Championships. *British Journal of Sports Medicine*, 51(4), 264–271.
- Roberts, M. F., Wenger, C. B., Stolwijk, J. A., & Nadel, E. R. (1977). Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *Journal of Applied Physiology*, 43(1), 133–137.
- Ross, M. L. R., Garvican, L. A., Jeacocke, N. A., Laursen, P. B., Abbiss, C. R., Martin, D. T., & Burke, L. M. (2011). Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(1), 123–133.
- Sawka, M. N., Leon, L. R., Montain, S. J., & Sonna, L. A. (2011). Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress. *Comprehensive Physiology*, 1(4), 1883–1928.
- Stevens, C. J., Taylor, L., & Dascombe, B. J. (2017). Cooling during exercise: An overlooked strategy for enhancing endurance performance in the heat. *Sports Medicine*, 47(5), 829–841.
- Yamakage, M., & Namiki, A. (2003). Deep temperature monitoring using a zero-heat-flow method. *Journal of Anesthesia*, 17(2), 108–115.
- 柳岡拓磨, 長谷川博, 広瀬統一. (2020). 暑熱環境下における身体外部・内部冷却併用の有効性の検討~運動間のリカバリーに着目して~. *デサントスポーツ科学*, 41, 60-67.