

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 —

広島大学 柳岡 拓磨
(共同研究者) 同 長谷川 博
早稲田大学 広瀬 統一

Combined Effect of Internal and External Cooling between Exercise Bouts on High-Intensity Endurance Exercise Performance in the Heat

by

Takuma Yanaoka
Graduate School of Education, Hiroshima University
Hiroshi Hasegawa
*Graduate School of Integrated Arts and Sciences,
Hiroshima University*
Norikazu Hirose
Faculty of Sport Sciences, Waseda University

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the combined effect of internal and external cooling between exercise bouts on high-intensity endurance exercise performance in the heat. Six active males completed two trials in a random order: 1) passive rest (control trial) and 2) wearing a cooling vest and ingesting ice slurry (cool trial). The two experiential trials consisted of two (first and second half), 30-min cycling exercises (i.e., 25 min of cycling at 55% of maximal oxygen uptake followed by 5 min of time trial) separated by a 15-min half-time break in the heat (i.e., 35.0°C, 50% relative humidity). In the cool trial, participants wore a cooling vest, which can

cool the neck, upper body, back, and side, and ingested 5.0 g/kg of ice slurry during half-time break. Time trial performance in the second half was substantially higher in the cool trial compared with the control trial. Rectal temperature at 45, 50, and 55 min and deep forehead temperature at 45 min were substantially lower in the cool trial compared with the control trial. Forehead and mean skin temperatures at 35, 40, and 45 min and neck skin temperature from 35 to 55 min were substantially lower in the cool trial compared with the control trial. Rating of perceived exertion at 50 min and thermal sensation from 35 to 50 min and at 60 and 65 min were substantially lower in the cool trial compared with the control trial. Thermal comfort and recovery rating scale from 35 to 45 min were substantially higher in the cool trial compared with the control trial. In conclusion, combined methods of internal and external cooling between exercise bouts maintained high-intensity endurance exercise performance and decreased core temperature in the initial part of the second half.

要 旨

本研究の目的は、暑熱下における運動間の休息中に行う身体外部・内部冷却の併用が高強度運動パフォーマンスに与える影響を検討することであった。6名の若年男性を対象に、暑熱下における2試行の無作為化交差試験を実施した。本試験では、15分間の運動間の休息（ハーフタイム）を挟む、30分間の自転車運動を2回（前・後半）行った。ハーフタイムでは、安静座位（コントロール試行）またはクーリングベストの着用・体重当たり5gのアイススラリーの摂取の併用（クーリング試行）のいずれかを行った。主評価項目は前・後半終了前5分間のタイムトライアルパフォーマンスとした。運動間の休息中の身体冷却によって、後半のタイムトライアルパフォーマンスが高い値で維持された。またクーリング試行の直腸温が後半開始0分、5分、10分で低下した。従って、本研究で用いた身体外部・内部冷却の併用は、運動パフォーマンスの維持・体温の低下の観点から暑さ対策として有効である可能性が示された。

緒 言

暑熱環境下における運動では、過度な深部体温の上昇による中枢性および末梢性の疲労が起これ、運動パフォーマンスが低下する。暑さ対策の手法の一つとして知られる身体冷却は、国際オリンピック委員会が2020年東京オリンピック・パラリンピック（2021年に延期予定）に向けて推奨している手法の一つである¹⁾。

運動前に行う身体冷却は、深部体温の低下による熱貯蔵量の増加、心拍数の低下、発汗率の減少による脱水の抑制、中枢神経系の活性低下の抑制などにより運動パフォーマンスの低下を防ぐことが広く知られている²⁾。一方で、球技系競技のハーフタイムやインターバルなどに代表される短時間の運動間の休息に着目すると、報告数が少なくさらなるエビデンスの蓄積が必要である。Peifferらは、暑熱下での運動間の15分の休息中に5分間の冷水浴を行うことで、深部体温を低下させ、運動パフォーマンスの低下を抑制したことを報告している³⁾。しかし、冷水浴は大量の水や浴槽の手配が必要であり、実践的な方法ではない。Onitsuka

らは体重当たり7.5 gのアイススラリー⁴⁾, Chaenらは14分間のクーリングベスト⁵⁾, Maroniらは15分間のクーリングベスト・グローブを用いて⁶⁾, 運動間の休息中の実践的な身体冷却を検討している。これらの先行研究では, 運動パフォーマンスの低下抑制と深部体温低下のいずれかしか達成されておらず, 双方に有効な冷却効果のより高い手法の提案が望まれる。

そこで本研究では, クーリングベストの着用およびアイススラリーの摂取の併用に着目し, 運動間の休息中に行う身体外部・内部冷却の組み合わせが高強度持久的運動パフォーマンスに与える影響を検討することとした。

1. 方法

1.1 被験者

本研究は, 運動習慣のある健康な若年成人男性6名を対象とした。被験者の身体特性は, 年齢 22.8 ± 3.0 歳, 身長 1.70 ± 0.13 m, 体重 63.1 ± 12.5 kg, 最大心拍数 (HR_{max}) 189 ± 13 拍/分, 最大酸素摂取量 (VO_{2max}) 49.4 ± 8.9 ml/kg/min (平均 \pm 標準偏差)であった。被験者には, 試験開始前に研究参加に関する説明を十分に実施し, 書面にて研究参加に対する同意を得た。本研究は, 広島大学の「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て, 実施した(認証番号: 01-27)。

1.2 研究デザイン

本研究は, 15分間の運動間の休息(ハーフタイム)中の身体冷却介入のみ異なる2試行の無作為化交差試験法を用いた。ハーフタイムの内容は, 1) 15分間の安静座位(コントロール試行), 2) 体重当たり5gのアイススラリーの摂取および14分間のクーリングベストの着用の併用(クーリング試行)のいずれかを行った。

本試験の測定項目に対する日内変動の影響を避

けるため, 2試行はすべて同じ時間に開始した。2試行の本試験は6日以上の間隔を空けて実施した。本研究は環境制御室で行われ, 本試験は暑熱環境下(気温: 35°C , 相対湿度: 50%), 漸増運動負荷試験は通常環境下(気温: 20°C , 相対湿度: 50%)で行われた。

1.3 研究プロトコル

被験者は, 最初に VO_{2max} および HR_{max} を測定するために自転車エルゴメーター(POWERMAX-V2, COMBI, Japan)を用いた漸増負荷試験を実施した。漸増運動負荷試験は, 100Wの負荷から開始し, 1分ごとに20W上昇させ, 疲労困憊まで行われた。漸増運動負荷試験を通じて, 呼気ガス分析(AE-310S, MINATO MEDICAL SCIENCE, Japan)およびHRの測定(Polar V800, Polar Electro, Finland)を30秒ごとに実施した。

本試験では, 被験者は最初に暑熱環境に設定した環境制御室に入室し, 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, 30分間の前半の運動を行った。前半の運動は, 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/分のサイクリング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。タイムトライアル終了後, 環境制御室内でコントロールまたはクーリング試行のいずれかを行った。15分間のハーフタイム後, 後半の運動を実施した。後半の運動内容は, 前半と同様とした。前半および後半の15分経過時に体重当たり2.5gの常温の水を摂取し, それ以外の水分摂取は認められなかった。本試験の運動プロトコルは, 先行研究³⁾および予備試験に基づき, 被験者が運動プロトコルを完遂できる最も高い運動強度として設定された。

1. 4 身体冷却介入

コントロール試行では、被験者は環境制御室内で15分間の安静座位を保った。運動間の休息開始直後および7.5分経過時に体重当たり2.5 gの常温のスポーツドリンク (Pocari Sweat, Otsuka Pharmaceutical, Japan) を摂取した。

クーリング試行では、アイススラリーの摂取およびクーリングベスト (Cooling Vest, Mizuno, Japan) の着用を行った。被験者は、ハーフタイム開始直後および7.5分経過時に体重当たり2.5 gのアイススラリー (スポーツドリンク [Pocari Sweat, Otsuka Pharmaceutical, Japan] を使用、ミキサー [TM8200, TESCOM, Japan] で作成) を摂取した。さらに被験者は、頸部および体幹部を冷却できるクーリングベストを14分間着用した。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した。クーリングベストの着衣および脱衣にそれぞれ30秒を要した為、14分間の着用とした。

1. 5 測定項目

1. 5. 1 運動パフォーマンス

高強度持久的運動パフォーマンスとして、タイムトライアル中の仕事量を測定した。前半のタイムトライアル中の仕事量を100%と定義し、後半のタイムトライアル中の仕事量の変化率を算出した。

1. 5. 2 体温

直腸温を直腸温度計 (LT-ST08-21, Nikkiso therm, Japan) を肛門括約筋から約10cm挿入し、1分間ごとに測定した。

前額部・頸部・胸部・上腕部・大腿部の皮膚温をサーミスタープローブ (LT-ST08-12, Nikkiso therm, Japan) を用いて、1分間ごとに測定した。平均皮膚温は、先行研究に基づき⁷⁾、算出された (平均皮膚温 = $0.43 \times$ 胸部 + $0.25 \times$ 上腕部 + $0.32 \times$ 大腿部)。

前額部および大腿部の深部体温を深部体温計

(CM - 210, Terumo, Japan) 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⁸⁾。

1. 5. 3 主観的項目

ボルグスケールを用いて、前・後半の5分ごとに主観的運動強度 (RPE) を測定した⁹⁾。

熱感覚 (TS) および熱快適感 (TC) を13ポイントのスケール (TS: -6 とても寒い, 6 とても暑い, TC: -6 とても不快, 6 とても快適) を用いて、試験を通して5分ごとに測定した¹⁰⁾。

ハーフタイム中のリカバリー尺度を11ポイントのスケール (0 回復していない, 10 とても回復した) を用いて、5分ごとに測定した。

1. 6 統計解析

運動間の休息中の身体冷却による測定項目への影響を検討するために、Magnitude-based inferences を用いた)。全ての測定項目の各測定ポイントに関して、試行間の効果量 (Cohen's d) およびその95% 信頼区間を算出し、身体冷却の効果を推定した。効果量の大きさは、無 (<0.2), 小 (0.2 ~ 0.5), 中 (0.5 ~ 0.8), 大 (>0.8) と定義し、Smallest worthwhile change は $d > 0.2$ とした¹²⁾。また、95% 信頼区間が正と負の両方の Smallest worthwhile change を上回っている場合、試行間の差は unclear と判断した¹¹⁾。Percentage likelihood は、< 1% : almost certainly not, 1-5% : very unlikely, 25-75% : possible, 75-95% : likely, 95-99% : very likely, > 99% : almost certain と定義した。すべての値は平均値 ± 標準偏差で示した。

2. 結果

2. 1 運動パフォーマンス

後半のタイムトライアルパフォーマンスはクーリング試行において、コントロール試行と比較し、高値を示していた (図1)。

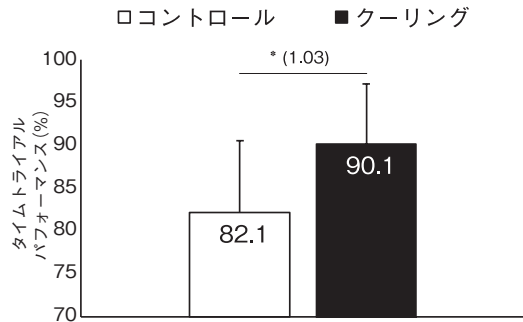


図1 タイムトライアルパフォーマンス
n=6, 平均±標準偏差, ()は効果量(Cohen's d)を示す,
シンボルの数は Percentage likelihoodを示す(*>75-95%, likely)

2.2 体温

直腸温は、45分、50分、55分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、低値を示していた(図2A)。60分から75分までの直腸温への身体冷却効果は、unclearであった。

前額部深部温は、45分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、低値を示していた。50分から75分までの前額部深部温への身体冷却効果は、unclearであった(図2B)。

前額部皮膚温は、35分、40分、45分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、低値を示していた。50分から75分までの前額部皮膚温への身体冷却効果は、unclearであった(図3A)。

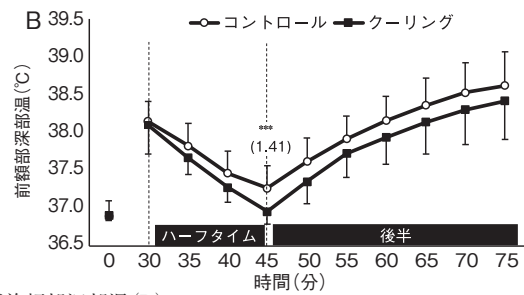
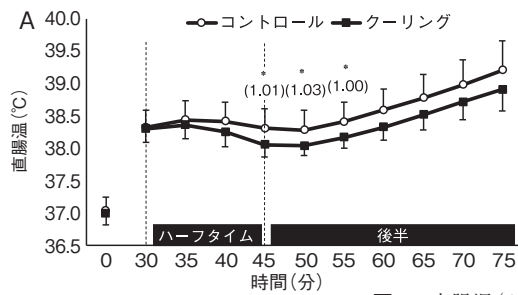


図2 直腸温(A) および前額部深部温(B)

n=6, 平均±標準偏差, ()は効果量(Cohen's d)を示す,
シンボルの数は Percentage likelihoodを示す(* > 75-95%, likely; *** > 99%, almost certainly)

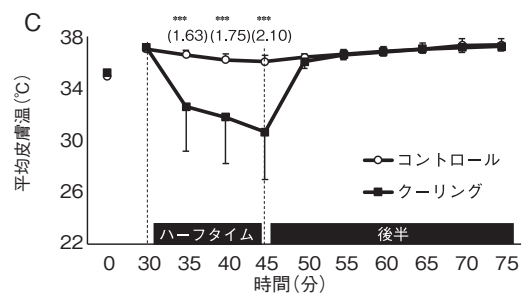
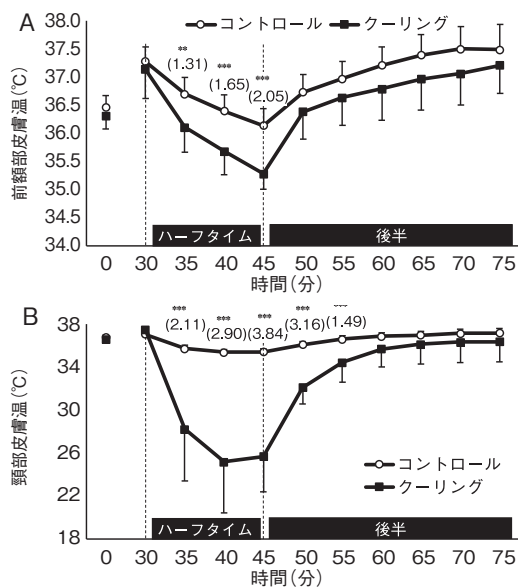


図3 前額部皮膚温(A)、頸部皮膚温(B) および平均皮膚温(C)

n=6, 平均±標準偏差, ()は効果量(Cohen's d)を示す,
シンボルの数は Percentage likelihoodを示す(* > 75-95%, likely; *** > 99%, almost certainly)

頸部皮膚温は、35分から55分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、低値を示していた。60分から75分までの頸部皮膚温への身体冷却効果は、unclearであった(図3B)。

平均皮膚温は、35分、40分、45分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、低値を示していた。50分から75分までの平均皮膚温への身体冷却効果は、unclearであった(図3C)。

2.3 主観的項目

RPEは、50分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、低値を示していた(図4A)。55分から75分までのRPEへの身体冷却効果は、unclearであった。

TSは、35分から50分、60分、65分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、低値を示していた(図4B)。55分、70分、75分のTSへの身体冷却効果は、unclearであった。

TCは、35分から45分でクーリング試行におい

て、コントロール試行と比較し、高値を示していた。50分から75分のTSへの身体冷却効果は、unclearであった(図4C)。

リカバリー尺度は、35分から45分でクーリング試行において、コントロール試行と比較し、高値を示していた(図4D)。

3. 考察

本研究は、暑熱環境下における運動間の休息中の身体外部・内部冷却の併用がその後の高強度持久的運動パフォーマンスに与える影響を検討した。本研究の結果、15分間の運動間の休息中に14分間のクーリングベストの着用と体重当たり5gのアイスラリーの摂取を併用することで、高強度持久的運動パフォーマンスが高い値で維持されること、直腸温が後半開始後10分間において低下することが明らかとなった。これまでの運動間の休息中の身体冷却に関する先行研究では、運動パフォーマンスの低下抑制と深部体温低下の2点を達成できていなかった^{4,5,6}。従って、本研

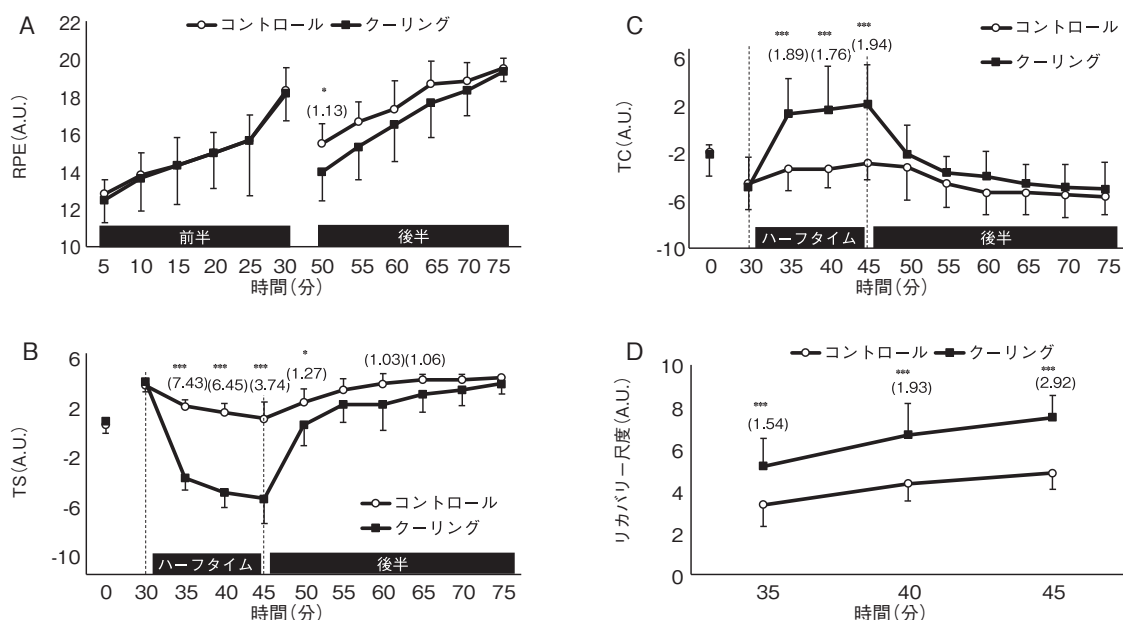


図4 主観的運動強度(RPE) (A), 熱感覚(TS) (B), 熱快適感(TC) (C) およびリカバリー尺度(D)
 n=6, 平均±標準偏差, () は効果量(Cohen's d)を示す,
 シンボルの数は Percentage likelihoodを示す(* > 75-95%, likely; *** > 99%, almost certainly)

究で用いた身体外部・内部冷却の併用はこれまでに用いられてきた身体冷却法より暑さ対策として優れている可能性が示された。

暑熱環境下における運動誘発性の高体温は、運動パフォーマンスの低下や熱中症を引き起こす主な要因の一つであることから¹³⁾、高体温を予防することはスポーツ選手にとって重要である。本研究では、直腸温はハーフタイム終了時、後半開始後10分間、脳温の指標である前額部深部温はハーフタイム終了時に身体冷却によって、低下した(図2B)。さらに、身体冷却効果は不明であるものの、直腸温および前額部深部温は後半終了時まで低値を示していた。アイススラリーは、水から液体への相変化時に熱を大きく吸収し、液体の比熱に固体の比熱が加わるため、深部体温を効率的に低下させる²⁾。さらに、アイススラリーの摂取は、頸動脈から脳へ流れる血液を冷却すること、および顔の表面温度を低下させ¹⁴⁾、脳の伝導性冷却をもたらす可能性が示されている。本研究でも、ハーフタイム中の前額部皮膚温は身体冷却により低下し(図3A)、後半終了時まで低値を示していた。このようなアイススラリー摂取による直腸温および前額部深部体温の低下が、高強度持久的運動パフォーマンスの維持に貢献していた可能性がある。

Chaenらは、運動間の休息中にクーリングベストを着用することで、皮膚温を低下させ、その後の運動パフォーマンスを維持したことを報告している⁵⁾。皮膚には温度受容器が存在するため、クーリングベストによって皮膚を冷却することで、求心性フィードバックを改善し、中枢性疲労の低減に寄与している可能性がある。特に頸部は高感覚温度受容器が存在している¹⁵⁾。また頸部冷却は、脳へ流れる血液を低下させ、脳温を低下させる可能性がある。従って、頸部を冷やすことができるクーリングベストは中枢性疲労の軽減により効果を有していた可能性がある。さらにTylerらは、

暑熱環境下において高い運動パフォーマンスを発揮するためには、TSを低下させることが重要であると述べている¹⁶⁾。本研究では、効果が認められた測定ポイントは異なるものの、主観的指標であるRPE、TS、TC、リカバリー尺度に冷却によるポジティブな効果が認められた。このような主観的項目の改善も高強度持久的運動パフォーマンスの維持に貢献していた可能性がある。

本研究では、クーリングベストの着用およびアイススラリーの摂取をそれぞれ単独で用いた試行はないため、それらを併用した相乗効果は明らかではない。アイススラリーを単独で摂取した場合、皮膚温を低下させずに深部体温のみが冷却され、深部から皮膚への温度勾配が低下することで、深部体温の上昇率が高くなることが報告されている²⁾。一方、本研究では後半の直腸温の上昇は、試行間でほぼ平行であり、深部体温の上昇率が高まっていない可能性がある。このような身体外部・内部冷却の併用による相乗効果のより詳細な検討が今後の研究で望まれる。

4. 結 論

暑熱環境下における運動間の休息中の身体外部・内部冷却の併用がその後の高強度持久的運動パフォーマンスに与える影響を検討し、クーリングベストの着用とアイススラリーの摂取を併用することで、高強度持久的運動パフォーマンスが維持されることが明らかとなった。

謝 辞

本研究に対して、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝いたします。また、被験者として協力いただいた皆様、計測にご協力いただきました岩橋眞南実さんに感謝いたします。

文 献

- 1) International Olympic Committee. Beat the heat during the Olympic Games Tokyo 2020. Retrieved from: <https://www.olympic.org/athlete365/well-being/beat-the-heat>
- 2) 鬼塚純玲, 長谷川博. 身体冷却の重要性とその応用. *トレーニング科学*, **26**: 139-146(2015)
- 3) Peiffer J.J., Abbiss C.R., Watson G., Nosaka K., Laursen P.B., Effect of a 5-min cold-water immersion recovery on exercise performance in the heat, *Br. J. Sports Med.*, **44**: 461-465(2010)
- 4) Onitsuka S., Ueno T., Zheng X., Hasegawa H., Effect of ice slurry ingestion during half-time breaks on intermittent exercise capacity and thermoregulation in the warm environment, *Gazz. Medica. Ital. Arch. per. le Sci. Mediche.*, **174**: 113-121(2015)
- 5) Chaen Y., Onitsuka S., Hasegawa H., Wearing a cooling vest during half-time improves intermittent exercise in the heat, *Front. Physiol.*, **10**: 711(2019)
- 6) Maroni T., Dawson B., Dennis M., Naylor L., Brade C., Wallman K., Effects of half-time cooling using a cooling glove and jacket on manual dexterity and repeated-sprint performance in heat, *J. Sport Sci. Med.*, **17**: 485-491(2018)
- 7) Roberts M.F., Wenger C.B., Stolwijk J.A., Nadel E.R., Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation, *J. Appl. Physiol.*, **43**: 133-137(1977)
- 8) Yamakage M. Namiki A., Deep temperature monitoring using a zero-heat-flow method, *J. Anesth.*, **17**: 108-115(2003)
- 9) Borg G.A., Psychophysical bases of perceived exertion, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **14**: 377-381(1982)
- 10) Olesen B.W., Brager GS. A better way to predict comfort: the new ASHRAE standard 55-2004, *ASHRAE.J.*, 20-26(2004)
- 11) Hopkins W.G., Marshall S.W., Batterham A.M., Hanin J., Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **41**: 3-12(2009)
- 12) Cohen J., Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates(1988)
- 13) Hasegawa H., Meeusen R., Takatsu S., Yamasaki M., Exercise performance in the heat: possible brain mechanism and thermoregulatory strategies, *Adv. Exerc. Sport. Physiol.*, **13**: 81-92(2008)
- 14) Onitsuka S., Zheng X., Hasegawa H., Ice slurry ingestion reduces both core and facial skin temperatures in a warm environment, *J. Therm. Biol.*, **51**: 105-109(2015)
- 15) Cotter J.D., Taylor N.A.S., The distribution of cutaneous sudomotor and alliesthesial thermosensitivity in mildly heat-stressed humans: An open-loop approach, *J. Physiol.*, **565**: 335-345(2005)
- 16) Tyler C.J., Sunderland C., Cooling the neck region during exercise in the heat, *J. Athl. Train.*, **46**: 61-68(2011)