

暑熱環境下における運動後の超低温冷却の有効性

EFFECT OF CRYO-STIMULATION AFTER EXERCISE IN A HOT ENVIRONMENT ON THE CARDIOVASCULAR SYSTEM AND THERMOREGULATION

金谷 和幸*¹, 河端 隆志*¹
Kazuyuki KANATANI*¹, Takashi KAWABATA*¹

*¹ 関西大学大学院人間健康研究科 Laboratory of Environmental Physiology for Exercise, Graduate School of Health and Well-being, Kansai University, Japan

Corresponding author: Takashi KAWABATA, E-mail :takakaw@kansai-u.ac.jp

ABSTRACT

The aim of the present study was to examine the effect of cryo-stimulation after exercise in a hot environment. The subjects completed a submaximal (70% V_{O_2max}) constant-load exercise test for 30 min in a hot environment ($T_a35^{\circ}C$, RH60%). After exercise, four experimental conditions were set: no cooling (CNT), whole-body cryo-stimulation (WBC) and lower limb cryo-stimulation (LLC) using a cryo-bath at $-120^{\circ}C$, plantar cryo-stimulation (PC) using an ice pack at $-55^{\circ}C$ for 2 min. There was a significant decrease in esophageal temperature, heart rate, muscle (thigh) temperature and forearm blood flow, and thermal sensation and a significant increase in stroke volume in after cryo-stimulation compared to CON. Skin temperature decreased significantly in WB and LL. After exercise cryo-stimulation cooled the skin, which caused vasoconstriction, and the flow of cooled blood from periphery to center, resulting in a decrease in core temperature. Two minutes of cryo-stimulation also reduced heat stress after exercise in a hot environment, suggesting the effectiveness of cryo-stimulation after exercise in a hot environment.

キーワード: 全身超低温刺激, 下肢超低温刺激, 足底部超低温刺激, 体温調節機能, 熱中症

Key Words : Whole-body cryo-stimulation, Lower limb cryo-stimulation, Plantar cryo-stimulation, Thermoregulation, Heat stroke

1. 緒言

地球温暖化により猛暑日の発生や熱波の頻度が増加傾向にあり、暑熱環境の悪化が進んでいる。地球規模でみても年平均気温は上昇しており、日本でも上昇している⁽¹⁾⁽²⁾。都市部などの人口密集地域では、地表面被覆の人工化や人工排熱が原因となり都市部の気温が郊外に比べて上昇するヒートアイランド現象が起こっている。

こういったことを背景に、日常生活、スポーツ活動中、労働現場など様々なところで熱中症の発生件数が増加傾向にあり社会問題となっている⁽³⁾。総務省消防庁によると、2023年7-9月の間に全国で熱中症により救急搬送された者は80577名で、この内107名の死亡が報告されている⁽⁴⁾。

人は暑熱環境への暴露により深部体温が上昇すると、血管を拡張し皮膚血流を増加させ発汗によって体外への熱放散を促進させる。しかし、熱放散がうまくいかず過度に体温が上昇すると生命維持に支障をきたし、熱中症や死の危険を伴う。また、労働や運動など身体活動中であるとさらに体温上昇は促進され、より一層の熱中症への注意が必要である⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。そのため、こまめな水分補給や身体冷却によって体温を下げるのが重要となってくる。身体冷却の手法としてはシャワーや冷水浴、氷嚢や冷却タオルを用いて全身や体の一部を冷却する方法が用いられている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

近年、日本のみならず世界的に全身冷却療法(Whole-body cryotherapy)という冷却療法が注目されてきている。Whole-body cryotherapyは、特別に設計されたチャンバーまたはキャビンのいずれかで、身体を最小限の服を着たまま超低温の空気($-130\sim-100^{\circ}C$)にさらす⁽¹¹⁾ことで体温を急速に低下させ炎症や筋肉の痛みを軽減する。そのため、Whole-body cryotherapyは

医療行為として利用されることが多く、世界で初めて低温療法が使用されたのは、1970年代の日本であった。山内は、慢性関節リウマチ膝関節に対し、氷嚢や冷湿布薬、温浴の寒冷療法、温熱療法など様々な方法と効果を比較し、 $-18^{\circ}C$ での冷凍マッサージが優れていることを報告した⁽¹²⁾。

高体温の状態から冷却することによって深部体温、皮膚および筋肉の温度を速やかに低下させることで身体へのストレスを軽減することが報告されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。冷却温度が低ければ素早く体温を低下させることが可能であり、超低温の空気によって身体を瞬時に冷却することは高体温状態からの回復を促進させる。超低温の冷却機能を使用することは近年の気温上昇による熱中症患者の増加予防のための有効な手段ではないかと考えられる。

そこで本研究では、cryo-stimulation(超低温刺激)を使用し、暑熱環境下での運動直後の高体温状態から全身、下肢および足底部への超低温冷却の有効性について運動環境生理学的視点から明らかとすることを目的とした。本研究では、自転車運動による活動筋の熱放散のため、活動筋への冷却として下肢冷却、末梢の動静脈吻合(AVA)を冷却し⁽¹³⁾、下肢の血液を冷却するため足底部冷却を行った。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は定期的に運動を行っている健康な成人6名(男性5名、女性1名、年齢: 24 ± 2 歳、身長: 175.5 ± 4 cm、体重: 71.3 ± 5.8 kg)を対象とした。男女を含めたヒトとして測定を行った。性差間については議論していない。被験者には、まず本実験の趣旨および内容などを十分説明し、同意を得たものについて被験者とした。女性の被験者は月経周期の影響を受けないよう

周期(卵胞期)を統一し、卵胞期と黄体期の間に生じる体温調節の違いを制御した⁽¹⁶⁾。

実験に先立ち、実験時の被験者への運動強度を決定するために、プレテストとして人工気候室(Ta25°C, RH40%)にて最大酸素摂取量(VO₂max)の測定を行った。

2.2 環境条件と運動様式

環境条件は、深部体温の上昇を促すため暑熱環境(Ta35°C, RH60%)を設定し、人工気候室(ESPEC社製)内において実施した。30分以上の椅坐位安静を取り、確認をしたのちデータとして10分間の安静時計測を行った。その後、持久性運動能力の指標の一つであるVO₂maxの生理的負荷強度(70%VO₂max)に相当する一定負荷運動(最大下運動)⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を30分間遂行した。運動終了後、クライオバスに2分間入り全身の冷却を行う全身冷却条件(whole-body cryo-stimulation:WBC)とクライオバスに下肢のみを入れる下肢冷却条件(lower limb cryo-stimulation:LLC)、足底部を保冷材で2分間冷却する足底部冷却条件(plantar sole cryo-stimulation:PC)と何もせず椅坐位安静(CNT)の4条件を実施した。運動終了後20分間は椅坐位安静を保ち、実験終了とした。実験は4条件とも同時刻に行い、実験間隔は、前の運動の影響がないように十分な期間(1週間以上)を空けて実施した。

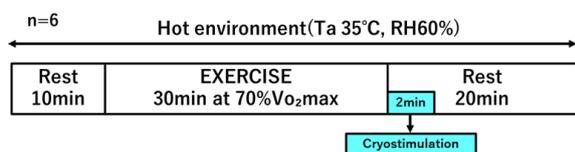


図1 環境条件と運動様式

2.3 測定項目

Tes(食道温)、大腿部筋温、皮膚温、HR(心拍数)、CO(心拍血量)、SV(一回心拍血量)、FBF(前腕皮膚血流量)を安静時より1分ごとに連続測定を行った。

2.4 実験プロトコル

被験者は、来室後、短パンとTシャツに着替えてから約300mlの水を摂取した後排尿をして体水分の平衡を行った。つぎに、人工気候室内にて椅坐位安静を取り、その間に計測機器を装着した。はじめに、心拍センサー(PolarH10)を装着した。CO、SV、平均動脈圧(EV-1000, Edward Lifescience Ltd.)は左手中指の指尖部にカフを装着し、ボリュームクランプ法およびフィジオキナル法により指動脈圧から上腕動脈圧を算出して連続的に測定を行った⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。さらに、Tesはサーミスター(LT-8, Gram Corporation)を鼻腔より身長1/4cm挿入し測定した。FBFはレーザードップラー法による血流測定器(ALF21, アドバンス社製)を左前腕外側部に装着して測定した。皮膚温は電極(RS PRO 熱電対用延長ケーブル, Tタイプ, アールエスコンポーネンツ社製)をそれぞれ測定部位(胸部, 前腕外側部, 大腿直筋, ふくらはぎ, 右足母指球, 右足踵)に装着し記録計(TR-W550, KEYENCE社製)を使用し測定し、平均皮膚温は4点法(胸部, 前腕外側部, 大腿直筋, ふくらはぎ)を用いて算出した⁽²¹⁾。大腿部筋温は熱流補償法を用いた深部温度計(Coretemp CM-210, Termo社製)を使用して、大腿部に深部温度測定用プローブPD1, Termo社製)を貼り付けて大腿直筋の筋温として測定した。

2.5 主観的温熱指標(温熱感覚スケール)

温熱感覚スケールは9段階(4:非常に暑い, 3:暑い, 2:暖かい, 1:やや暖かい, 0:どちらでもない, -1:やや涼しい, -2:涼しい, -3:寒い, -4:非常に寒い)のスケールを用いて行った⁽²²⁾。測定のタイミングは運動終了時, 運動終了後2分(冷却刺激終了後), 運動終了後10分(冷却刺激終了後8分), 運動終了後15分(冷却刺激終了後13分), 運動終了後20分(冷却刺激終了後18分)とした。

い, 1:やや暖かい, 0:どちらでもない, -1:やや涼しい, -2:涼しい, -3:寒い, -4:非常に寒い)のスケールを用いて行った⁽²²⁾。測定のタイミングは運動終了時, 運動終了後2分(冷却刺激終了後), 運動終了後10分(冷却刺激終了後8分), 運動終了後15分(冷却刺激終了後13分), 運動終了後20分(冷却刺激終了後18分)とした。

2.6 冷却装置

本研究で全身および下肢を冷却するために冷却装置クライオバス(クライオバス[®], エイディーディー社製)を使用した。電気式の冷却装置であり、最大-120°Cの冷気を生成することができる。このクライオバスは、液体窒素を使用していないため、生体への危険性も低いものと言える。また、足底部を冷却する保冷材(ADDCOLD[®]-45, エイディーディー社製)は温度:-55~-60°C, 接触部位温度:19~28°C(測定機器:電極:RS PRO 熱電対用延長ケーブル, Tタイプ, アールエスコンポーネンツ社製, 記録計:TR-W550, KEYENCE社製)になるものを使用した。使用する際には、保冷材をタオル(綿素材で厚さ2mm程度)に包み床に置き靴下を着用したまま使用した。

2.7 統計解析

本実験の測定値は平均値±標準偏差(mean±SD)で示した。運動時および運動後のTes, HR, CO, SV, 平均皮膚温, 大腿部筋温, FBF, 温熱感覚スケールは2要因(条件×時間)の繰り返しのある分散分析を用いて分析した。有意差が検出された場合には各群間の差をボンフェローニ法を用いて多重比較検定を行った。すべての統計処理における有意水準はp<0.05とした。

なお本実験は関西大学人間健康学部研究倫理委員会の承認(2021-16)を得て実施した。

3. 結果

運動終了後2分間の冷却刺激が深部温(Tes)に及ぼす影響についてみると、冷却刺激2分間終了後のWBC(38.2±0.5°C), LLC(38.3±0.6°C)およびPC(38.4±0.4°C)それぞれの値は、CNT(38.6±0.5°C)と比較して有意に低値を示し、この有意な差は実験終了まで維持された。また、冷却部位の違いによる比較では、冷却刺激終了後2分目からPC(38.2±0.4°C)によるTes反応よりもWBC(37.8±0.4°C)およびLLC(37.9±0.4°C)による値に有意な低値が示され、実験終了まで維持された。さらに、冷却刺激終了後3分からLLC(37.8±0.4°C)に対してWBC(37.6±0.4°C)のTesが有意に低値を示し、実験終了まで有意な低値が維持された(図2)。

FBF反応に及ぼす運動終了後の冷却刺激の影響についてみると、冷却刺激2分間終了後より、CNT(13.1±3.1ml/min/100g)と比較してWBC(8.9±1.2ml/min/100g), LLC(9.9±4.1ml/min/100g)およびPC(10.2±3.1ml/min/100g)の値が有意に低値を示した(図2)。また、冷却刺激暴露条件間(WBC, LLC, PC)にはFBF反応の差を認めることはできなかった。

運動終了後2分間の冷却刺激における大腿部筋温の動態をみると、冷却刺激2分間終了後のWBC(37.9±0.4°C)およびLLC(38.1±0.6°C)の値はCNT(38.7±0.7°C)およびPC(38.5±0.6°C)と比較して有意に低値を示し、その後実験終了まで有意に低値を示した。また、PCの動態をみると冷却刺激7分目からCNT(38.4±0.7°C)と比較してPC(38.1±0.5°C)の値が有意に低値を示し、実験終了まで有意に低い値が示された(図3)。

皮膚温の反応を平均皮膚温で見ると、運動終了後の冷却刺激開始1分よりWBC(34.3±0.7°C)およびLLC(35.3±1.0°C)に

低下がみられ、CNT($36.8 \pm 0.5^\circ\text{C}$)と比較して有意に低値を示した(図3)。PCにおける平均皮膚温にはCNTとの有意な差を認めることはなかった。また、WBCとLLCとの間には有意な差は認められなかった。

PCにおける保冷材(ADDCOLD®-45)と接地していた足底部の皮膚温(母指球、踵)については、冷却刺激により母指球部位($24.9 \pm 3.9^\circ\text{C}$)および踵部位($19.2 \pm 2.7^\circ\text{C}$)の低値を示した。また、実験終了時では母指球部位($37.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$)および踵部位($36.2 \pm 1.0^\circ\text{C}$)の皮膚温を示した(図4)。

冷却刺激に対する心臓・循環器系反応についてみると、冷却刺激後2分目のHRは、WBC($123 \pm 13\text{bpm}$)、LLC($130 \pm 16\text{bpm}$)およびPC($128 \pm 12\text{bpm}$)のそれぞれにおいてCNT($135 \pm 12\text{bpm}$)よりも有意に低値を示し、それらの低値傾向は運動終了20分目まで維持された(図5)。SVにおいては冷却刺激終了後2分目からWBC($79 \pm 7\text{ml}$)、LLC($83 \pm 12\text{ml}$)およびPC($77 \pm 12\text{ml}$)それぞれの条件下で、CNT($73 \pm 9\text{ml}$)の値と比較して有意に高値を示し、その傾向は実験終了まで維持した。HR、SVともに冷却方法の違いによる差は認められなかった。HRとSVの積であるCOについては、冷却部位の違いによる影響およびCNTとの間に差は認められなかった(図5)。

温熱感覚スケールで計測した冷却刺激後の主観的温熱感覚については、冷却刺激終了時でWBC(0.3 ± 1.4)、LLC(0.8 ± 0.7)およびPC(2.2 ± 1.1)の値がCNT(3.7 ± 0.5)と比較して有意に低値を示した。さらに冷却刺激終了後8分目においてもWBC(1.0 ± 0.8)およびLLC(1.2 ± 1.1)の温熱感覚はCNT(2.7 ± 0.9)より有意に低値を示した。その後、冷却刺激終了後13分以降の温熱感覚についてはCNTと有意な差を認めなかった(図6)。

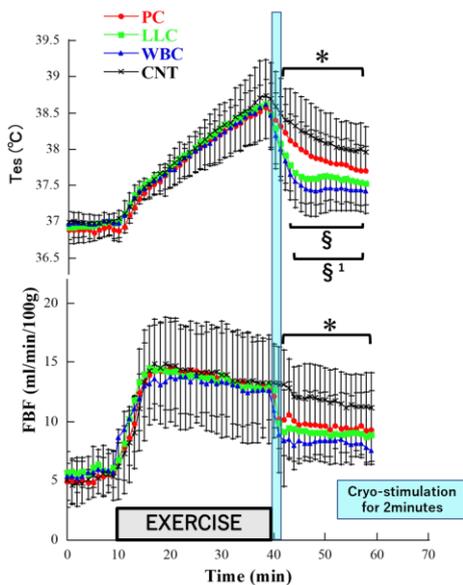


図2 Tes, FBFの安静時及び運動時の動態 * $P < 0.05$ CNT vs WBC, LLC, PC. § $P < 0.05$ PC vs WBC. §¹ $P < 0.05$ LLC vs WBC (mean \pm SD).

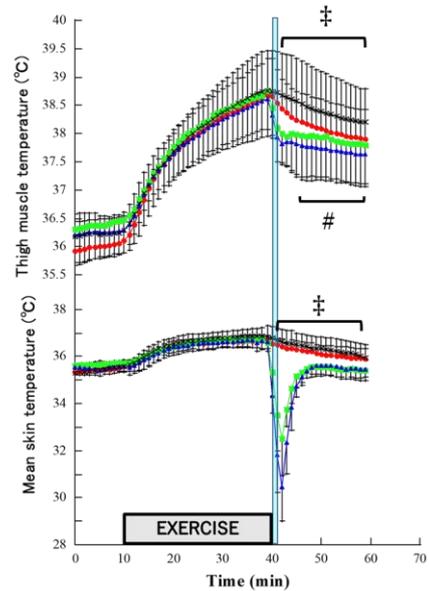


図3 大腿部筋温,平均皮膚温の安静時及び運動時の動態 ‡ $P < 0.05$ CNT, PC vs WBC, LLC. # $P < 0.05$ CNT vs PC (mean \pm SD).

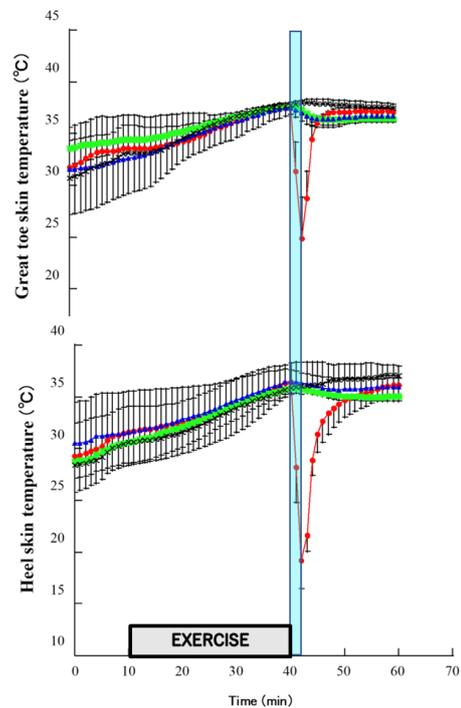


図4 足底部皮膚温(母指球, 踵)の安静時及び運動時の動態

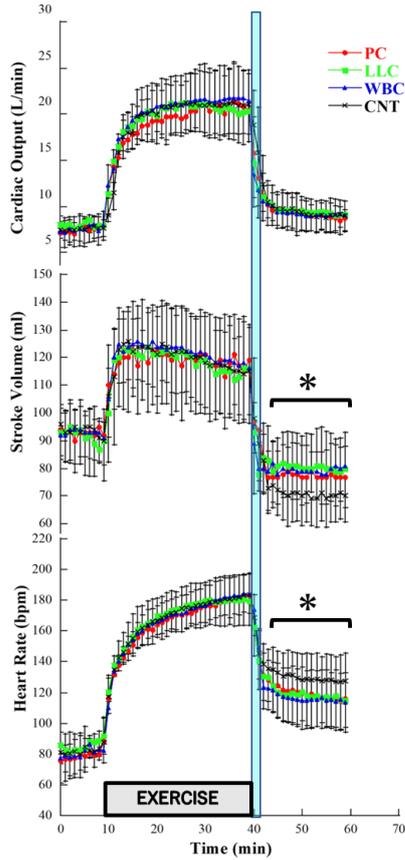


図5 HR, SV, COの安静時及び運動時の動態 * $P < 0.05$ CNT vs WBC, LLC, PC (mean \pm SD).

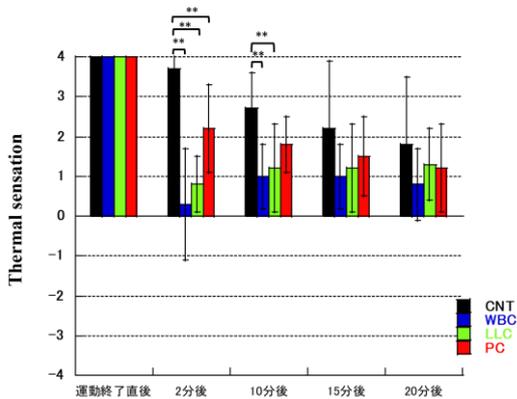


図6 運動後の温熱感覚スケールの動態 ** $P < 0.05$ vs CNT

4. 考察

本研究では、暑熱環境下での運動後の高体温の状態から全身、下肢および足底部への超低温冷却を行い有効性について検討した。

運動後の超低温冷却刺激においてCNTと比較しTes, 筋温, FBF, HRにおいて有意な低値を示し, SVでは有意に高値を示した。

冷却刺激によって、血管収縮を引き起こし、冷却された血液が静脈還流して、深部温を低下させることが報告されている⁽²⁵⁾。Tesでは冷却後、CNTと比較し冷却条件において有意に低値を示し、実験終了まで低値を維持した(図2)。WBC,

LLCおよびPCでは冷却温度が異なるためTesに差があらわれた。また、四肢部と体幹部の熱放散量⁽¹³⁾および身体部の冷却面積の違いによってWBCとLLCでの差がみられた。

平均皮膚温では、CNTおよびPCと比較してWBCおよびLLCで有意に低値を示した。皮膚温は冷却後急速に低下する⁽¹⁴⁾。皮膚温の変化の大きさは、温度勾配⁽²³⁾、表面積⁽¹⁴⁾と正の相関がある。そのため、冷却面積が大きく、冷却温度の低いWBCとLLCでは有意に低値を示し、冷却温度が高く、冷却面積の少ないPCではCNTと差がみられなかったと示唆される(図3)。

外部環境(暑熱環境)および運動による筋収縮による熱産生で、血液に熱が伝わることによって深部温が上昇する。その熱が皮膚表面から発汗、伝導、放射、対流などによって体外に放散される。皮膚血流では血流量を多くし、熱放散を促進させるため、冷却を行わなかったCNTにおいてFBFが高値を示したと考えられる。皮膚血管の拡張・収縮は深部体温や皮膚温(全身および局所)の変化が、視床下部の体温調節中枢に入力され、反射的に皮膚血管の収縮または拡張を引き起こす⁽²⁴⁾。本研究ではレーザードップラー法による血流測定器を使用し、実測値で示しているため、測定部位、体動などの影響が考えられるものの冷却条件(WBC, LLC, PC)でFBFの有意な低下が示された。

大腿部筋温の動態では、WBCおよびLLCにおいて超低温の冷却刺激によって皮膚表面の冷却と冷却された血液により大腿部筋温の低下を引き起こしたと考えられる(図3)。PCにおいても保冷材と接地していた足底部の皮膚温が母指球部位で $24.9 \pm 3.9^\circ\text{C}$ 、踵部位で $19.2 \pm 2.7^\circ\text{C}$ まで低下し(図4)、AVAを介し冷却された血液が大腿部の筋肉との熱交換を促進し、筋温の低下を引き起こしたと示唆される(図3)。

また、冷却刺激によって血管拡張が抑制されて静脈還流量が増加し、運動後のSVの低下が抑制されたのではないかと考えられる⁽²⁶⁾。体温の上昇により発汗による体液損失とFBFの増加による皮膚静脈への血液の貯留が静脈還流量を減少させ、右心房圧の低下を引き起こし、SVが減少する⁽²⁷⁾。これは心臓の内因性機構としてのFrank-Starling機序によるものである。静脈から心臓に還ってくる血液が多い(静脈還流量が増加する)と心室の拡張期終末の容積が大きくなり、SVも増加する。反対に静脈還流量が減少するとSVが減少する。身体冷却によって皮膚血管拡張を軽減し、静脈還流量を増加させ、HRの増加を抑制することが報告されており⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾、CNTと比較しWBC, LLCおよびPCにおいて超低温冷却刺激によって皮膚血管拡張が抑制されて静脈還流量が増加し、運動後のSVの低下が抑制されHRが低値を示したと考えられる(図5)。また、静脈還流の増加により血流量が増加すると、乳酸などの老廃物を除去する能力が高まり、運動からの回復も促進されることが報告されている⁽¹⁰⁾。

温熱感覚スケールにおいても超低温冷却刺激において低値を示し、冷却条件において主観的な温熱ストレスが軽減できていると考えられる(図6)。超低温冷却によって体温、循環器系および温熱感覚に改善がみられたため、暑熱環境下での高体温状態での超低温冷却は有効ではないかと示唆される。

5. 結論

2分間の超低温冷却によってCNTと比較してWBCおよびLLCではTes, 大腿部筋温, FBF, HRの有意な低下が認められ、SVにおいて有意な増加が認められた。足底部の超低温冷却においてもCNTと比較してTesの低下、HRの有意な低下が認められ、SVにおいて有意な増加が認められた。

運動後の高体温の状態から超低温冷却によって皮膚表面が冷却されたことにより、血管収縮を引き起こし、末端から中心部へと冷却された血液が流れ、深部温が低下した。また、超低温冷却は短時間で皮膚表面だけでなく筋温も低下させることが示された。よって、運動後の超低温冷却は短時間で体温の低下と循環器系機能の回復の方法として有効であると考え、熱中症患者の増加予防のための有効な手段ではないかと考えられる。しかし、超低温冷却を行うには本実験で使用した装置や設置スペースを必要とするため費用や運用面で課題が残る。

6. 参考文献

- (1)南利幸, 天候の変化と気象情報に関する話題, 日本生気象学会誌, (2012),pp43-44.
- (2)気象庁, 日本の年平均気温, (2023)
- (3)環境省, 熱中症環境保健マニュアル, (2022), 環境省環境保健部環境安全課.
- (4)総務省消防庁, 令和5年(7月~9月)の熱中症による救急搬送の状況, (2023).
- (5)J.González-Alonso, C.Teller, S.Andersen, F.Jensen, T.Hyldig, B.Nielsen, Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat, *Journal of Applied Physiology*, 86-3 (1999), pp1032-1039.
- (6)B.Nielsen, J.Hales, S.Strange, N.Christensen, J.Warberg, B.Saltin, Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment, *The Journal of physiology*, 460 (1993), pp467-485.
- (7)L.Nybo, P.Rasmussen, M.N.Sawka, Performance in the heat-physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue, *Comprehensive physiology*, 4-2(2014), pp657-689.
- (8)J.Parkin, M.Carey, S.Zhao, M.Febbraio, Effect of Ambient Temperature on Human Skeletal Muscle Metabolism during Fatiguing Submaximal Exercise, *Journal of Applied Physiology*, 86-3(1999), pp902-908.
- (9)芳田哲也, 日本における熱中症予防研究, 日本生気象学会誌, 52-2(2015), pp97-104.
- (10)C.C.W.G.Bongers, M.T.E.Hopman and T.M.H.Eijssvogels, Cooling interventions for athletes: An overview of effectiveness, physiological mechanisms, and practical considerations, *Temperature*, 4(2017), pp.60-78.
- (11)G.Banfi, G.Lombardi, A.Colombini and G.Melegati, Whole-Body Cryotherapy in Athletes, *Sports Medicine*, 40(2010), pp. 509-517.
- (12)山内寿馬・野上貞夫・延永正, 慢性関節リウマチに対する局所冷凍マッサージの効果, *リハビリテーション医学*, 14-1 (1997), pp47-55
- (13)K.Hirata, 動静脈吻合(AVA)血流と四肢からの熱放散調節 Blood Flow through Arteriovenous Anastomoses(AVA) and Regulation of Heat Losses from the Extremities in Human, *日本生気象学会雑誌*, 53-1(2016) pp3-12.
- (14)P.Janwantanakul, The effect of quantity of ice and size of contact area on ice pack/skin interface temperature, *Physiotherapy*, 95(2009), pp.120-125.
- (15)N.A.S.Taylor, J.N.Caldwell, A.M.J.V. Den Heuvel, M.J.Patterson, O.Yanagisawa, T.Homma, T.Okuwaki, D.Shimao, H.Takahashi and P.Janwantanakul, To cool, but not too cool: That is the question-immersion cooling for hyperthermia, *European Journal of Applied Physiology*, 40(2009), pp.1962-1969.
- (16)L.A.Stephenson and M.A.Kolka, Menstrual cycle phase and time of day alter reference signal controlling arm blood flow and sweating, *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 249(1985), pp.R186-R191.
- (17)P.O.Åstrand and K.Rodahl, *Textbook of work physiology*(1986), MacGraw-Hill, New York
- (18)山地啓司・横山奉行, 持久性トレーニング(強度, 時間, 頻度, 期間)の最大酸素摂取量への影響, *体育学研究*, 32-3(1987), pp.167-179.
- (19)S.A.Bartels, W.J.Stok, R.Bezemer, R.J.Boksem, J.Van Goudoever, T.G.V.Cherpanath, J.J.Van Lieshout, B.E.Westerhof, J.M.Karemaker and C.Ince, Noninvasive cardiac output monitoring during exercise testing: Nexfin pulse contour analysis compared to an inert gas rebreathing method and respired gas analysis, *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 25(2011), pp.315-321.
- (20)M.Panzarino, A.Gravina, V.Carosi, P.Crobeddu, A.Tiroli, R.Lombardi, S.D'Ottavio, A.Galante and J.M.Legramante, Cardiovascular and hemodynamic responses to adapted physical exercises in very old adults, *Aging Clinical and Experimental Research*, 29(2017) pp.419-426.
- (21)N.L.Ramanathan, A new weighting system for mean surface temperature of the human body, *Journal of Applied Physiology*, 19(1964), pp.531-533.
- (22)多屋秀人, 温熱環境の主観的評価, *繊維学会誌*, 47-11(1991), pp.650-656.
- (23)O.Yanagisawa and T.Fukubayashi, Diffusion-weighted magnetic resonance imaging reveals the effects of different cooling temperatures on the diffusion of water molecules and perfusion within human skeletal muscle, *Clinical Radiology*, 65(2010), pp.874-880.
- (24)平田耕造, 皮膚血流量の温熱生理学, *繊維製品消費科学*, 36-1(1995), pp12-17
- (25)W.Gregson, M.A.Black, H.Jones, J.Milson, J.Morton, B.Dawson, G.Atkinson and D.J.Green, Influence of cold water immersion on limb and cutaneous blood flow at rest, *The American Journal of Sports Medicine*, 39(2011), pp.1316-1323.
- (26)L.B.Rowell, HUMAN CIRCULATION. in *Circulatory adjustments to Dynamic Exercise and Heat Stress: Competing Controls*, Oxford University Press, 1986. pp.363-406.
- (27)H.Nose, A.Takamata, G.Mack, Y.Oda, T.Kawabata, S.Hashimoto, M.Hirose, E.Chihara and T.Morimoto, Right atrial pressure and forearm blood flow during prolonged exercise in a hot environment. *Pflügers Arch:European Journal of Physiology*, 426(1994) pp.177-182.

- (28)L.B.Rowell, H.J.Marx, R.A.Bruce, R.D.Conn, FKusumi, Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *The Journal of Clinical Investigation*; 45(1966), pp.1801-1816
- (29)J.T.Costello, P.R.Baker, G.M.Minett, FBieuzen, I.B.Stewart and C.Bleakley, Cochrane review: Whole-body cryotherapy (extreme cold air exposure) for preventing and treating muscle soreness after exercise in adults, *Journal of Evidence-Based Medicine*, 9(2016), pp.43-44.

(Received January 19, 2024, Accepted April 20, 2024)