

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：32203

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11364

研究課題名（和文）高体温時障がい者に対する対流の原理を用いた身体冷却方法の検討

研究課題名（英文）Body cooling using concept of convection for persons with impairment

研究代表者

上條 義一郎（Kamijo, Yoshi-ichiro）

獨協医科大学・医学部・教授

研究者番号：40372510

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、対流の原理を用い、脊髄損傷者の暑熱環境下で運動後に上昇した深部体温を効果的に低下させることができないか、検討した。頸髄損傷者群では運動強度50%V02peakが5ワット程度になる。室温25℃で30分間の上肢運動をするとき、瘦せている選手では同運動時に深部体温がむしろ低下し、前腕皮膚温も低下した。深部体温減少と前腕皮膚温減少には正の相関関係を認めた。健常者の50%V02peakは20ワット程度であったが、同環境下において5ワットで運動した際、深部体温は低下した。前腕部の動きにより対流による熱放散が亢進したと解釈できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

障がい者選手の病態背景、サポート体制も様々であるため、同選手へのサポートは個別対応が基本となる。東京パラリンピック開催に際して、暑さが注目されたが、一方、これに関する知見があまりにも不足し、それまで正しいだろうと考えられてきた手法が実は熱中症発症リスクを高めてしまうことであった。例えば、頸髄損傷者が運動する際、彼ら、彼女らは全く発汗がないため、うつ熱を生じやすい。そのため、顔面などに冷水で霧吹きをするという習慣があった。しかし、実際に深部体温を測定すると、霧吹きを行うとかえってうつ熱状態になってしまう。対流の原理を用いた頸髄損傷者に対しても安全な体外冷却方法の開発は社会的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：There are as many countermeasures of heat illness as there are persons with impairments. Because cutaneous vasodilation and sweating are absent or partially suppressed in persons with spinal cord injuries in a hot environment, heat storage would be likely to find in this population.

We assessed whether the using the principle of convection would effectively suppress an increase in a body core temperature during exercise in persons with spinal cord injuries. The averaged exercise intensity at 50% V02peak is approximately 5 watts in the group of cervical spinal cord injury. In lean persons, core temperature rather decreased from baseline during 30-min upper limb exercise at thermoneutral condition, as did their forearm skin temperature. The 50% V02peak of able-body persons was around 20 watts. When they exercised at 5 watts in the same environment, their core temperature also decreased. The results suggest that the movement of the forearm enhanced heat dissipation by convection.

研究分野：障がい者スポーツ医科学

キーワード：体温調節 非蒸散性熱放散

1. 研究開始当初の背景

スポーツ庁はスポーツを通じた共生社会の実現のため「一億総スポーツ社会」を目指し、障がい者のスポーツ実施率を2017年の20%から5年間で40%まで引き上げる目標を掲げている(第2期スポーツ基本計画、スポーツ庁)。障がい者が安全にスポーツを行うための環境づくりや支援のために、障がい者やその指導者が各々の病態/生理機能に合わせた運動の実施や環境変化に対する適切な対策が必要であり、そのため現場からはその知識や情報の提供が強く望まれている。

障がい者のスポーツ参画を妨げる一つの要因に暑熱環境がある。研究代表者らは大分国際車いすマラソンの過去20年間の気象データとレース完走率との関連性を検討し、頸髄損傷選手では気温20°Cを境にして気温が低くても高くても完走率が悪くなることを示した(図1, Kamijo et al. 投稿前)。運動時に於いて、20°C以上の気温上昇は頸髄損傷者にとり大きな負担となる。

体温調節反応は自律/行動性体温調節に分かれる。障害のない者では高体温時に皮膚血管拡張/発汗反応を促し過剰な深部体温上昇を抑制し(自律性体温調節)、夏季にはこれらの反応が亢進する(暑熱馴化)。下肢に麻痺がある胸腰髄損傷者(胸腰損)の障害領域では深部体温上昇による皮膚血管拡張/発汗反応は消失し、非障害領域ではこれらの反応は観察されるが健常者に比べて抑制され(代表者ら未発表データ)、四肢麻痺のある頸髄損傷では全身で消失する。脊髄損傷者が室温32°Cで60分間の中等度運動を行った時、頸髄損傷者では運動中の産熱量が一番低いにもかかわらず運動終了時の体温が2°C上昇し、胸腰髄損傷者の約2倍高かった(Price & Campbell 2003)。即ち、頸髄損傷は「うつ熱」を起こしやすい。

頸髄損傷者における「暑熱馴化」に関するエビデンスはなく、むしろ否定的である(Trbovich et al. 2016)。従って、同者において深部体温上昇を抑え、上昇した深部体温をいち早く低下させるためには、身体外部からの冷却が行われる。臨床や競技の現場においては大がかりな設備は期待できないため、“より簡便な身体冷却方法”が望まれる。

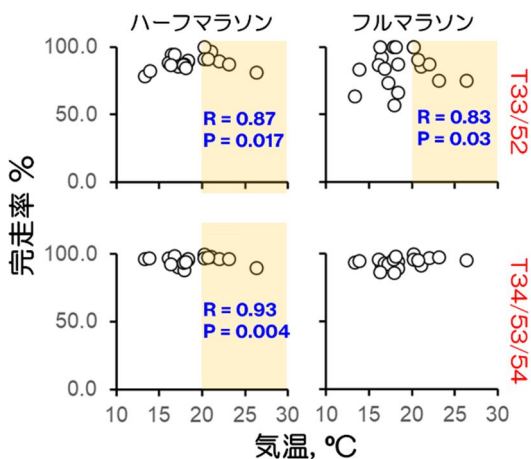


図1. 大分国際車いすマラソンレース過去20年間の完走率と気温の関係。右赤字は障害クラスを示し、T33/52, 頸髄損傷 C7-8 レベル相当; T34/53/54, 胸腰髄損傷相当

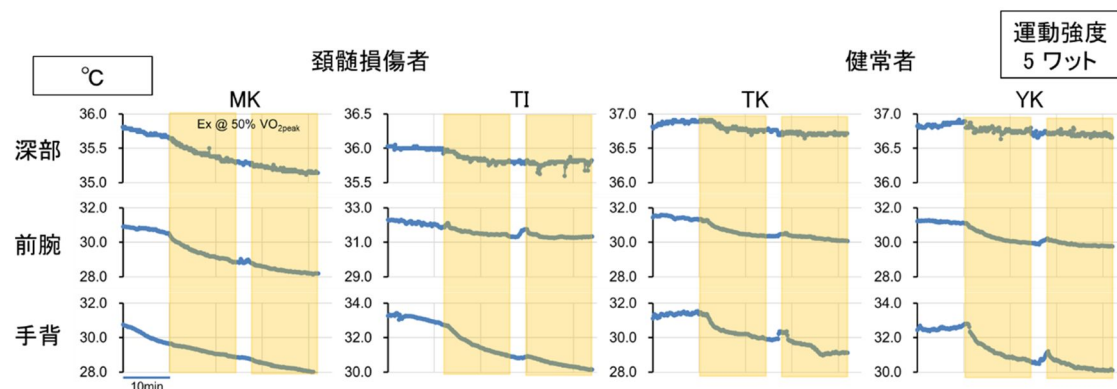


図2. 頸髄損傷者、健常者のそれぞれ2名の室温25°Cにおける5ワットの強度による30分間の上肢エルゴメーター運動時の深部体温、前腕・手背皮膚温。

四肢は熱放散に有利な構造となる。四肢の皮膚は体幹に比べて表面積/容積比が大きく(腕5倍、手10倍、手指22倍)、四肢末端部の皮膚には動静脈吻合(AVA)血管があり、拡張時の内径は毛細血管に比べて大きく、体深部の熱を皮膚表面へ運び出し、外界へ放散させやすい(平田ら2016)。車いす選手9名(四肢麻痺2名、対麻痺3名を含む)が31°C、60%の環境下において50%最大酸素摂取量(VO_{2peak})で1時間上肢運動を行い深部体温が約1.2°C上昇後、10°C冷水で10分間のハンド・クーリングを行うと、行わなかったときと比べて深部体温が0.4°C低下した(Goosey-Tolfrey et al. 2008)。研究代表者らは、室温25°Cで無風状態の部屋において、頸髄損傷者と健常者に同じ絶対負荷(5ワット)で30分間の上肢エルゴメーター運動を実施した際に、頸髄損傷者では運動開始後深部体温低下を認め、この反応のパターンが前腕や手背部の皮膚温低下のパターンに非常に似ていた(図2)。健常者も頸髄損傷者と同じ負荷で運動すると、同様に深部体温低下を認めたが、その低下は頸髄損傷者に比べると弱かった。上肢駆動により手や前腕に対流が生じたため、この部位での熱放散が亢進した結果と考えられ、その効果は健常者より高いことを示す。

以上より、頸髄損傷者の上肢を冷却し、もっと効率よく深部体温を低下させる方法はないだろうか？ これが本研究における学術的な「問い」である。

2. 研究の目的

本研究の目的： 本研究では、対流の原理を用いて、暑熱環境下における脊髄損傷者（特に頸髄損傷者）の運動中や体温上昇後の回復期に上肢を冷却し、深部体温上昇や低下の大きさを比較し、効率よく冷却する方法を検討するための基礎的な情報を得ることを目的とする。

頸髄損傷者にも安全で手軽に行える体外冷却方法を確認し提案すること。

3. 研究の方法

(1) 測定方法の確立

深部体温計測方法：これを測定するために、研究協力者は測定前日の21時頃にピルセンサーを飲む様に指示を受ける。測定準備場所に到着後、測定者はデータレコーダー（CorTemp, HQInc., FL, US）で深部体温が検出できるかどうかを確認し、サンプリング間隔は1秒に設定する。レコーダーは車いすレーサーの場合はシートの下、立位選手の場合は腰に装着する。センサーとレコーダーの距離は50cm以内に収まるような配慮をする。この方法論の妥当性は、脊髄損傷者と健常者のアームクランク運動中の食道温と比較することによってすでに検証されている（Au et al. Spinal Cord. 2019; 57(7): 586-593.）

屋外での車いす自走時の活動量測定：気圧センサーが組み込まれた3軸加速度計（JD Mate、キッセイコムテック、松本、日本）でモニターされる。JD Mateをレーサーの背面に垂直に設置し、レーサー走行中の酸素消費量（VO₂）を推定する。この装置の有効性は、信州大学スポーツ医科学研究チームにより、上り坂、下り坂、階段の段差における代謝の変化も踏まえた、歩行中のエネルギー消費量を推定できることが確認された（Yamazaki et al. Medicine and Science in Sports and Exercise. 2009; 41(12): 2213-2219.）

$eVO_2 [mL/kg/min] = a VM + b Hu + c Hd$ ----- (1)

eVO₂, 推定VO₂; VM, 3軸加速度（[G]、前後、左右、上下）から計算されたノルム; Hu, Hd, それぞれ上昇速度と下降速度で大気圧の連続測定から計算 [m/秒]; a, b, c, 定数。彼らはまた、サイクリング中のVO₂の推定も同様のアルゴリズムが適応できることをしめしている（未発表データ）。これをもとに研究代表者らは、8名の若年者（女性/男性=1/7; 年齢20歳~33歳; 体重47kg~68kg）に日常生活様の車椅子を用い、トレッドミル上で3段階の速度で駆動させたときのVMが実測VO₂と相関するか評価した（この測定は平地で行われていたためHuとHd成分は考慮されていない）。前述のJD Mateを車椅子のバックシートに垂直にセットし、呼気ガスを採取するマスクを装着し、VO₂を(METAMAX 3B, CORTEX Biophysik GmbH, Leipzig, Germany)を測定した。参加者は車椅子に座ったまま3分間休憩し、その後時速3kmで3分間、次に6km/hr、9km/hrで3分間駆動させた。各ステージ最後の1分間のVMとVO₂の値を平均しました。

人工気候室内での体温測定：食道・平均皮膚・局所温はA/D変換器(34970A; Agilent Technologies)を用いる。タイプT(Cu-Co)熱電対を用い、ゼロコンを用いて基準の0を安定に維持させる。食道プローブはPE-90を用いて作成した。

(2) 車いす選手レーサー自走時における活動量に対する深部体温上昇の評価

車いす選手合宿時における5000mタイムトライアル時の深部体温変化と活動量から推定される消費エネルギー量の関係を検討する。深部体温は前述のCoreTempシステム・手順で行い、活動量は前述のJD Mateを同様に装着して測定する。VO₂[L/min]をエネルギー消費量[kcal/min]に換算する際、非タンパク質呼吸商を0.82とすると、4.825kcal/O₂ 1Lと仮定し算出する。

(3) アイスベストの運動時体温上昇抑制効果の検証

2名の健康な若年男性が気温32~34、相対湿度70~80%に制御された人工気候室に入り、エルゴメーターに座り、食道プローブを飲み込み、胸部に心電図用の電極をセットしながら安静をとる。20分間のベースライン測定後、両者は各々の50%VO_{2peak}で15分間の自転車運動を2セット実施する。セット間は15分間である。協力者Aは最初のセットでアイスベストを着用し、2セット目はこれを着用せず、もう一人の協力者Bはその逆を行った。2セット終了後は20分間の回復期とした。

(4) 手冷浴の効果検証

気温26~28、健常男性(49歳、体重85kg、身長170cm)が1時間のエルゴメーター運動の後、座位にて両手の水浴(水温23)を10分間行った。深部体温は前述のCoreTempを用いた。

(5) 車いす選手運動時の水分出納の検証

車いすハーフマラソン(晴れ、気温13.9、相対湿度70%、風速1.7m/秒)を完走した参加者を対象に体液減少量を評価するため、レース前、レース直後、レース後約1時間後に体重と水分摂取用ボトルの重量を測定し、採血を行う。同じタイミングで尿サンプルを採取した後、体重を測定する。血中ヘモグロビン濃度、ヘマトクリット、血清浸透圧、尿量と浸透圧を評価した。

4. 研究成果

(1) 測定方法の確立

屋外での車いす自走時の活動量測定：VO₂はVMと有意な相関を示した($r=0.83$; $P<0.000001$)。このモデルでは原点を通る回帰式と仮定すると、 $r=0.966$; $P<0.000001$ でVO₂が指定されることが示された。

(2) 車いす選手レーサー自走時における活動量に対する深部体温上昇の評価

研究協力者はT54の中長距離選手3名(K, H, W)で、合宿地の天候は曇り、気温22~26、相対湿度70~98%であった。安静時深部温度は、3名とも36.4~36.8であった。5000mタイムトライアルの結果、Kでは、トライアル終了時には0.50上昇し、タイムは約810秒であった。推定エネルギー消費量は66.3kcalで、その後深部体温上昇は5分間続き、さらに0.1上昇した。Hでは、0.61上昇し、タイムは約570秒、推定エネルギー消費量44.3kcalで、最終的にはトライアル終了後3分間続き、さらに0.14上昇した。Wでは、深部温度はトライアル終了までに0.39上昇し、タイムは約720秒、推定エネルギー消費量は56.8kcalであった。トライアル終了4分後までさらに0.07上昇した。気温が25程度でも、相対湿度は80%を超え、さらにレーサーという空気抵抗を軽減させているデザインが、熱ストレスを増悪させていることが示された。

(3) アイスベストの運動時体温上昇抑制効果の検証

期間中、深部体温としての食道温計測方法を検討し、東京パラリンピック開催に際して、日本パラ陸上選手のアップ時の急激な深部体温上昇を抑制する目的で、企業と共同で体外冷却用アイスパック入り冷却ベストを試作し、高温多湿環境下においてはその効果を確認した。協力者Aでは、心拍数(HR)は安静時約70拍/分から1セット目終了時に約160拍/分まで増加し、2セット目終了時に早く190拍/分まで増加した。協力者Bでは安静時約70拍/分から1セット目終了時に約180拍/分、2セット目終了時には170拍/分程度に止まった。深部体温上昇は、協力者Aでは1セット目+1.2、2セット目終了時+1.1であり、協力者Bでは1セット目+1.9、2セット目終了時+0.9であった。アイスベストは一度上昇した深部体温を下げる効果はないが、運動時に着用することで深部体温上昇を抑える効果がある事が示された。

(4) 手冷浴の効果検証

10分間で深部体温が0.23低下した。手を冷水につけるだけという、手軽で安全な方法であるが、効果がある可能性が示された。

(5) 車いす選手運動時の水分出納の検証

頸髄損傷者5名(SCI_C; 平均年齢43歳; 平均受傷年数23年; 平均レースタイム83.4分; 傷害レベルC5/6-C8)および6名の胸腰脊髄損傷(SCI_{TL}; 44歳; 22年; 61.6分; Th3/4-L1)が本測定に参加した。SCI_{TL}の1名はレース1時間後の尿が採取できなかった。レース中の尿量と摂取量はそれぞれ約200mL、700mLで、群間に有意差はなかった。発汗量はSCI_Cでほぼ0g、SCI_{TL}で約500gであり、SCI_{TL}の方が有意に高かった。レースから1時間後、SCI_C5名中2名とSCI_{TL}5名中1名が正味の水分バランスが負になった。体重変化は、データが欠落していた1名のSCI_{TL}を除くすべての参加者で1%以内であった。血漿量の変化率はレース前後で両群ともに有意な変化を認めなかった。しかし、SCI_{TL}ではレース直後は負であったがレース1時間後には+5%程度まで上昇した。血清浸透圧はSCI_C、SCI_{TL}でそれぞれ約288または289mOsm/kgH₂Oであったが、SCI_{TL}では295mOsm/kgH₂O程度まで増加し、その後、レース前の値と同様のレベルに戻った。一方、SCI_Cでは約280mOsm/kgH₂Oまでに減少し、レース1時間後まで維持された。損傷レベルで体液量の変化には差がないが、血清浸透圧の変化には差があった。

(6) 研究成果の情報発信

公益財団法人日本リハビリテーション医学会パラリンピック・障がい者スポーツ委員会、日本障がい者スポーツ学会の監修のもと、公益財団法人障がい者スポーツ協会医学委員会が作成し同協会が発行した「パラアスリートのための熱中症予防Q&A」の作成に貢献した。また、日本パラ陸上連盟強化委員会・暑熱対策委員として、パラ陸上アスリートに向けた「暑熱対策に関する情報」を同連盟ホームページより発信した(暑熱対策コラム、JPA 日本パラ陸上競技連盟公式サイト jaafd.org)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chika Sato, Yoshi-ichiro Kamijo, Yuta Sakurai, Shohei Araki, Yuki Sakata, Ayana Ishigame, Kota Murai, Izumi Yoshioka, Fumihito Tajima	4. 巻 14
2. 論文標題 Three-week exercise and protein intake immediately after exercise increases the 6-min walking distance with simultaneously improved plasma volume in patients with chronic cerebrovascular disease: a preliminary prospective study.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 BMC Sports Sci Med Rehabil.	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s13102-022-00429-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Fujita Y, Kamijo YI, Kinoshita T, Hashizaki T, Murai K, Yoshikawa T, Umemoto Y, Kaminaka C, Shibasaki M, Tajima F, Nishimura Y.	4. 巻 62(4)
2. 論文標題 Observations of cold-induced vasodilation in persons with spinal cord injuries.	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Spinal Cord.	6. 最初と最後の頁 170-177.
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41393-024-00960-3.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 リハビリテーション医療におけるフィジカルフィットネスの重要性(教育講演EL70)
3. 学会等名 第58回日本リハビリテーション医学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 リハビリテーション医療における患者身体活動量の定量化の試み(LS01 ランチョンセミナー)
3. 学会等名 第58回日本リハビリテーション医学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 東京2020パラリンピック競技大会のレガシー パラスポーツにおける医科学支援の今後の展開
3. 学会等名 第59回日本リハビリテーション医学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 基礎のシンポジウム 4「体温調節と自律神経機能」脊髄損傷者における体温調節
3. 学会等名 第75回日本自律神経学会総会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 リハビリテーション医学・医療の視点から患者の運動器と健康長寿を考える
3. 学会等名 第95回日本整形外科学会学術総会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 パラアスリートにおける基礎研究東京パラリンピックに向けたパラアスリートに対する暑熱対策
3. 学会等名 第37回日本整形外科学会基礎学術集会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 運動生理学の視点から健康寿命延伸に寄与するリハビリテーション医療を考える
3. 学会等名 第7回日本リハビリテーション医学会秋季学術集会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 パラスポーツにおける体温調節障害の影響と対応
3. 学会等名 第58回日本脊髄障害医学会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上條義一郎
2. 発表標題 地域在住者の健康寿命を延ばすために急性期リハビリテーション医療が果たす役割
3. 学会等名 第54回日本リハビリテーション医学会東北地方会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------