

論 文 内 容 要 旨

Thermoregulatory responses in persons with
lower-limb amputation during upper-limb
endurance exercise in a hot and humid
environment

(下肢切断者における高温多湿環境での上肢持久性
運動中の体温調節反応)

Prosthetics and Orthotics International, 2021, in
press.

主指導教員：木村 浩彰教授
(広島大学病院 リハビリテーション学)
副指導教員：安達 伸生教授
(医系科学研究科 整形外科学)
副指導教員：杉山 一彦教授
(広島大学病院 がん化学療法科学)

福原 幸樹

(医歯薬保健学研究科 医歯薬学専攻)

ヒトの体温は熱産生と熱放散のバランスにより通常約 37° に保たれる。運動や身体活動により熱産生が高まると、皮膚温の上昇や汗の蒸発による熱放散反応によって、体温が調節される。しかし、熱産生が熱放散を上回ると体温が上昇し始める。熱産生の指標には酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) が用いられ、体温変化を対照群と比較検討する場合は $\dot{V}O_2$ を一定にすることが推奨される。

近年、身体機能や健康状態、QOL の向上のために、障がい者がスポーツに参加する機会が増えている。一方で、スポーツ参加に伴うリスクとして、外傷や熱中症が挙げられる。健常者では、スポーツ活動中の熱中症予防運動指針が示されているが、障がい者全般の暑さ対策や体温調節反応については一定の見解が得られていない。脊髄損傷者は運動により麻痺領域の過度な皮膚温上昇（うつ熱）や発汗量の減少を示すため、体温が上昇しやすい。これは熱産生よりも熱放散能の低下によるものとされる。

下肢切断者は熱放散に必要な体表面積が小さいため、上記のように熱放散能の低下により下肢切断者も体温が上昇しやすいとされた。先行研究では、下肢切断者の 10km マラソン時の体温変化や暑熱環境下安静時の体温変化の報告はあるが、熱産生や環境温が一定でなく、体温上昇のしやすさは未だ憶測にすぎない。

副論文では、気温 32°C・相対湿度 50%の環境で運動したが、下肢切断者の体温上昇は健常者と差がなく、非切断側下肢で熱放散を補う代償性発汗を示唆した。残された課題として、下肢切断者の代償性発汗は下肢だけでなく、上半身にも示す可能性がある。また、熱放散にのみ焦点を当てており、熱産生の検討はない。さらに、国際的なパラスポーツ大会が高温多湿環境で開催されることもあるため、その環境での体温調節反応を理解することは重要だが、不明である。

主論文の目的は、高温多湿環境での上肢持久性運動中の下肢切断者の体温、 $\dot{V}O_2$ 、皮膚温、発汗量を測定し、健常者の体温調節反応と比較検討することである。副論文を参考に、下肢以外での発汗量が増加するという代償機構が存在すれば、高温多湿環境でも下肢切断者の体温は健常者と差がないと仮説を立てた。

健常男性 9 名 (AB 群) と下肢切断者 9 名 (LLA 群) を対象に、人工気象室内を気温 33°C・相対湿度 70%に設定し、60%の運動強度で 60 分間の上肢持久性運動を行った。下肢切断者の内訳は大腿切断者 4 名、下腿切断者 5 名であり、切断原因は交通事故、骨肉腫、バーシャー病であり、切断後平均期間は約 18 年であった。下肢切断者の体表面積は健常者よりも小さかった (AB 群 $1.7 \pm 0.1 \text{m}^2$ 、LLA 群 $1.5 \pm 0.2 \text{m}^2$ 、 $p=0.01$)。運動中の $\dot{V}O_2$ は両群で差がなかった。また、運動に伴い両群とも体温が上昇したが、群間差はなかった。一方で、下肢切断者の胸部の発汗量は健常者よりも多かった (繰り返しのある二元配置分散分析 [群×時間]、群効果、 $p<0.01$ 、効果量は中等度、 $\eta^2=0.10$)。また、下肢切断者の全身発汗量は健常者よりも多く (AB 群 $1.0 \pm 0.3 \text{kg}$ 、LLA 群 $1.4 \pm 0.4 \text{kg}$ 、 $p=0.01$)、脱水率も高かった (AB 群 $1.5 \pm 0.5\%$ 、LLA 群 $2.1 \pm 0.5\%$ 、 $p=0.03$)。

主論文の目的は、高温多湿環境で一定強度の上肢持久性運動を行った際の下肢切断者の体温、熱産生・熱放散反応を健常者と比較検討することでした。高温多湿環境でも胸部での代償性発汗が起こり、健常者の体温よりも上昇しないと仮説を立てた。今回の結果は、この仮説を裏付けるものであり、下肢切断者の体温は運動中に上昇するものの、高温多湿環境でも健常者の体温と差

がなかった。

代償性発汗の一般的な事例として、多汗症の交感神経遮断術後に生じる代償性発汗がある。神経遮断した支配領域の発汗量は減少するが、他部位の発汗量が増える。また、健常者が暑さに慣れるメカニズムとして、暑熱順化がある。これは熱ストレスを繰り返し受け、汗腺を活性化させることで発汗反応を高め、体温上昇を緩やかにすることを意味する。下肢切断者は義足歩行など日常的な身体活動やスポーツ参加による熱ストレスにさらされる。このように、下肢切断者は日ごろから繰り返し熱ストレスを受けることで、熱ストレスに対処するために残された皮膚の汗腺が活性化させ、代償性発汗を獲得するのかもしれない。脊髄損傷者は感覚情報が体温中枢にフィードバックされないため、体温上昇に伴う熱放散の代償機構が働かないとされる。しかしながら、副論文と主論文の結果から、下肢切断者は体表面積の減少によって熱放散能が低下するのではなく、むしろ残された皮膚で熱放散反応を高めていることが明らかになった。

一方で、多くの発汗は脱水症の進展が懸念される。代償性発汗はからだを冷やす効果が高い反面、脱水症の進行による熱中症のリスク増大には注意が必要である。このことから、下肢切断者が高温多湿環境下で運動する場合、熱中症リスクを軽減するために、より多くの水分を摂取する必要があると考える。