

暑熱曝露時の身体冷却が脊髄損傷者の深部体温および皮膚温に及ぼす効果 —屋外活動時間延長のための対策の検討—

林 聡 太 郎 石 本 恭 子

要旨

ヒトの体温調節は、熱産生と熱放散によって深部体温が約37℃で一定に保たれている。しかしながら、中枢神経である脊髄を損傷した脊髄損傷者は交感神経性調節機能不全となり、受傷部以下の体温調節機能が低下している。本研究は、体温調節障害を有する高位脊髄損傷者における暑熱曝露に対する身体冷却が、深部体温である直腸温、鼓膜温および外殻温度の皮膚温上昇抑制に及ぼす効果について検討することを目的とした。暑熱曝露30分前にアイススラリーを摂取させるIS条件、暑熱曝露時に、クーリングベストを着用させるCV条件、直達日射を遮りクーリングベストを着用する混合型のCom条件からなる3条件で、30分間の暑熱下滞在をさせた。IS条件では環境温に依存してTmeanが著しく上昇し、冷涼な部屋に戻っても健常者と比較すると高値を維持したが、CV条件は皮膚温の過度な上昇を抑制した。麻痺部が大きく発汗による熱放散が制限される者にとって、皮膚直接的な冷却と直達日射からの保護を組み合わせることによって、Tskinの上昇とそれに伴うTmean上昇を抑制できることが示唆される。これは脊髄損傷者における暑熱下での屋外の活動制限を大きく改善させる可能性がある。今後の研究課題として検討していく暑熱対策は、冷却水やアイススラリーなどの飲料よりもCV着用と輻射熱を減弱させる方法が、日常生活の中で活用しやすく望ましいことが考えられた。

キーワード：脊髄損傷、深部体温、暑熱環境、身体冷却

1 はじめに

脊髄損傷は外力が関わることによって、脊髄に圧迫や挫創が生じ、脊髄が損傷されることをいう。脊髄損傷者の多くは、車いすを用いて生活をしているが、一般に車いす生活では健常者に比して身体活動量が少ない。下肢および全身の筋量が減少していることから、基礎代謝量も低い傾向にあり、内臓脂肪の過剰蓄積を呈し、高血圧、感動脈疾患や2型糖尿病を含む多くの生活習慣病のリスクを持つことが推察される。また、ヒトは熱産生と熱放散によって深部体温を約37℃で一定に保っているが、中枢神経である脊髄を損傷した脊髄損傷者は交感神経性調節機能不全となり、受傷部以下の体温調節機能が低下している。脊髄損傷者は健常者と比較すると、環境温

に依存して深部体温が変動しやすく、寒冷環境においては深部体温が健常者よりも低下し、暑熱環境では深部体温は上昇することが示されてきた (Pollock et al., 1951; Guttmann et al., 1958)。これは脊髄損傷による血管運動の欠落だけでなく、発汗作用の減少が皮膚血流および発汗反応を小さくさせることが要因である (Muraki et al., 1995, 1996; Yamasaki et al., 2000; Attia and Engel, 1983:)。損傷レベルの影響が大きい者ほど、麻痺領域が広範囲に及んでいることから (Gemmer et al., 1992; Petrofsky, 1992)、健常者と比較して熱放散ができず貯熱しやすく、体温上昇が顕著である。一方で寒冷環境においては、麻痺部の筋運動が著しく低く熱産生に乏しいことに加えて、血管が収縮しにくいことから、末梢部の冷えを引き起こし深部体温の低下につながる。

また、末梢部の温度の低下は手先の巧緻性を著しく低下させ、車いす駆動を困難にさせる。

スポーツ現場における身体障害者の適切な体温の保持に対する方略については、四肢の冷却 (Goosey-Tolfrey et al. 2008b)、アイススラリー (Lee et al. 2008, 内藤と大柿 2015) や冷却水 (Byrne 2011)、クーリングベスト (Goosey-Tolfrey et al. 2008a) のような身体冷却が用いられているが、トップアスリート以外はそのような対策を講じていないのが現状である。体温調節が困難な身体障害者において適切な体温を維持することは、運動習慣の確保と屋外での身体活動の質と量を向上させるために極めて重要であり、暑熱下および寒冷下における体温維持のための方略を立案することは緊要な課題である。特に暑熱下における屋外活動は、制限が大きく暑熱障害等の事故が頻発している情勢がある。したがって本研究は、体温調節障害を有する高位脊髄損傷者における暑熱曝露に対する身体冷却が、深部体温である直腸温、鼓膜温および外殻温度の皮膚温上昇抑制に及ぼす効果について検討することを目的とした。

2 方法

2.1 被験者

被験者は、頸椎損傷者 1 名 (以下SCI; Spinal Cord Injury) と、健康な成人健常者 1 名 (以下AB; Able-bodied) とした。SCIは、事故によるC5の完全損傷であった。可動域は肘関節上部までであり、発汗は頭部と上背部のみである。日常的に電動車いすを用いており、その他の慢性的な疾患はない。本研究は、ヘルシンキ宣言に則り、被験者の人権を擁護し実施した。実験内容を口頭および書面で説明し、同意書への署名を受け承諾を得た。SCIにおいては自筆が困難であったことから、介助者が被験者の前で代筆した。

実験を遂行するにあたり、不測の事態に備え、脊髄損傷者の医療的ケアの実施実績がある看護師に研究協力を得た。SCIの生理的指標を測定する皮膚温計や心拍計、体腔内に挿入する直腸温計等の貼付および挿入は、被験者の同意のもとにすべて看護師が行った。

2.2 実験手順

本研究は連続した3日間で、暑熱曝露30分前にアイススラリー (以下IS; ice slurry) を3g/kg摂取させるIS条件、暑熱曝露時に、クーリングベスト (以下CV; cooling vest) を着用させるCV条件、直達日射を帽子の着用およびタープによって遮り、CVを着用する混合型のCom (Combined) 条件からなる3条件を試行した。実験はすべて晴天時に行われ、全試行を完遂した。表1に実験日の環境条件を示した。

室温27℃、湿度50%の屋内で30分間の座位安静を保った後に、SCIは電動車椅子、ABは歩行によって屋外に出た。座位での30分間屋外暑熱曝露後に再度冷涼な環境の屋内に移動し、回復期として30分間の座位安静を保った。90分間の実験中は、生理的指標を5分ごとに測定し、環境測定を10分ごとに測定した。また、長時間にわたる姿勢の保持による褥瘡予防のため、SCIは5分ごとに電動車椅子による姿勢変換を行なった。

表1 実験日の環境条件

	Ta(°C)	RH(%)	Tg(°C)	WBGT(°C)
屋内	27.1 ± 0.1	51.5 ± 2.0	29.2 ± 0.2	23.4 ± 0.2
屋外	33.0 ± 0.5	57.6 ± 6.8	39.5 ± 0.8	30.1 ± 0.9

Ta; 気温または室温, RH; 湿度, Tg; 黒球温度, WBGT (湿球黒球温度) を示す。屋内の室温および湿度はほぼ一定に保たれており、実験期間内は一定であった。屋外は晴天で3日間の環境条件は一貫した気象条件で実施した。

2.3 測定項目

測定項目は、曝露環境と生理的指標とした。室内および屋外の暑熱環境は、気温または室温、湿度、黒球温度および湿球黒球温度 (WBGT, Wet Bulb Globe Temperature) を、熱中症指標計 (WBGT 203-A/B, 北浜製作所) を用いて測定した。生理的指標には、体温のパラメータとして直腸温 (以下T_{re}, rectal temperature)、鼓膜温 (以下T_{ty}, tympanic temperature)、専用のプローブによって測定し、皮膚温は、皮膚表面に貼付するセンサーを用い、専用のロガーを用いて抽出した。SCIは、自身での体腔用プローブの挿入が困難であったために、看護師が潤滑剤を利用して挿入を行なった。その他の指標として心拍数 (以下HR, heart rate)、主観的温熱感覚 (以

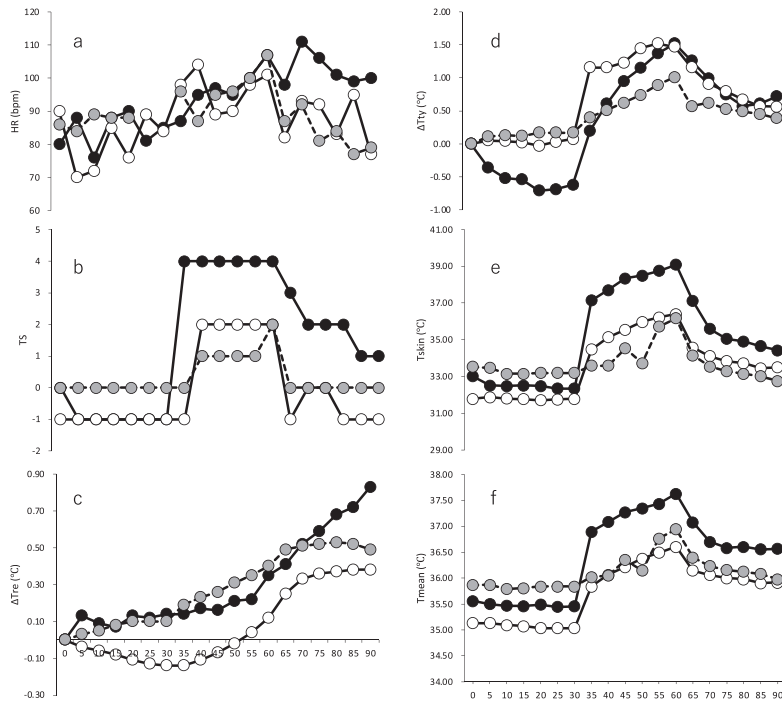


図1. 暑熱曝露によるSCIのHR, TS, 深部体温平均皮膚温および平均体温の変動
 ●; IS条件, ○; CV条件, ●; Com条件を示す. それぞれa; HR, b; TS, c; ΔT_{re} , d; ΔT_{ty} , e; T_{skin} , f; T_{mean} の変動である. 30～60minの間で暑熱環境での滞在を実施した. 暑熱曝露前の体内冷却は, 一時的に体温の低下を惹起するものの体温を低下させ続けておくことが困難であり, 冷涼な部屋に移動しても高体温が持続する. CVの着用は暑熱曝露に対し皮膚温および深部体温の急激な上昇を抑制し, 暑熱曝露後の体温低下を促進させた.

下TS, Thermal sensation) を測定した. HRの測定は, POLAR H10 (POLAR) を用いた. TSは, +4「とても暑い」, から0「どちらでもない」, -4「とても寒い」までの9段階の尺度を用い, 印字したスケールを指差しまたは口頭で記録者に伝えさせた. 皮膚温は, 上腕部, 胸部, 大腿部および腓腹部の4点を同時に計測し, 以下の式 (a) によるRamanathan法によって, 平均皮膚温 (以下 T_{skin} , skin temperature) を算出した. また, 平均体温 (以下 T_{mean} , mean temperature) は式 (b) によって算出した. T_{re} および T_{ty} については, 曝露前の安静時からの変化量で示した.

$$(a) \text{平均皮膚温 } (T_{skin}) = 0.3 (\text{上腕部} + \text{胸部}) \\ \times 0.2 (\text{大腿部} + \text{腓腹部})$$

$$(b) \text{平均体温 } (T_{mean}) = 0.7 (\text{直腸温}) \\ \times 0.3 (\text{平均皮膚温})$$

3 結果

3.1 SCIにおける条件間の比較

図1にSCIの各条件におけるHR, TS, 深部体温, 平均皮膚温および平均体温の変動を示した. HRに顕著な変動は見られなかったが, IS条件では, 事前のISの経口摂取によって一時的な T_{ty} の減少が見られたが, 3g/kgでは T_{re} を減少させる効果は見られなかった. 暑熱曝露後においても他条件と比較すると高値のまま推移した (a). CVを着用しないIS条件では, 主観的な温熱感覚が顕著に高く, 皮膚表面の4点から算出した T_{skin} および深部体温と T_{skin} から算出した T_{mean} が暑熱曝露と同時に大きく上昇し, 冷涼な部屋への移動後の回復期においても高値であった. CV条件における ΔT_{re} は, 実験開始前の T_{re} が著しく高かったために暑熱曝露前に減少を示したものの, 最低点

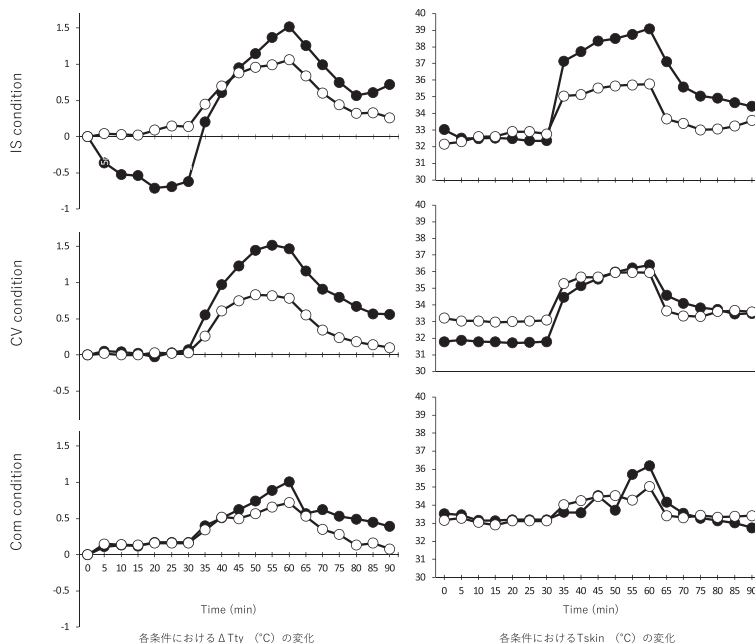


図2. SCIとABにおける ΔT_{ty} および T_{skin} の比較

それぞれ●; SCI, ○; ABを示す。IS条件ではSCIの鼓膜温が顕著に低下したが、暑熱曝露を受けてSCIの鼓膜温は急激に上昇し、冷涼な部屋に戻ると低下した。CV条件におけるSCIの ΔT_{ty} は、顕著な上昇を示し、回復期においてもABと比較して高値を維持した。 T_{skin} はCVおよびCom両条件において、SCIとABが同様の変化を示した。

からの上昇は他条件と同値であった (c)。

3.2 SCIとABの生理的指標の比較

暑熱曝露時の心拍数は、SCIがABと比較してすべての条件で高値を維持した。収縮期血圧および拡張期血圧は、SCIがABと比較してすべての条件で低値を示したが、SCIにおいては姿勢変換による血圧の変動が大きく拡張期血圧はいずれの条件でも74-90 mmHg、収縮期血圧は52-62mmHgの間で推移した。ABにおいては室内安静時からの変化は見られなかった。Treは、すべての条件でABが維持または低下を示したのに対し、SCIは暑熱曝露後から緩やかな上昇を示し、暑熱曝露30分時点から回復期30分まで持続した (IS; 37.00℃, SV; 36.69℃, Com; 37.27℃)。SCIはそれぞれの条件において、安静滞在時から0.21℃, 0.26℃, 0.21℃の上昇した。

図2に輻射熱の影響を大きく受けた ΔT_{ty} および T_{skin} のSCIとABの比較を条件ごとに示した。ISの経口摂取をしたことで、ABに比してSCIの鼓膜温が顕著に低下したが、暑熱曝露を受けてSCIの鼓膜温は急激に上昇し、冷涼な部屋に戻ると低下した。ABも約1℃上昇したが、冷涼な部屋に移動するとベース値近くまで低下し続けた。 T_{skin} はISの影響を両被験者とも受けなかった。暑熱曝露による上昇および回復期の T_{skin} の低下は、 ΔT_{ty} 同様の変化を示した。CVおよびCom条件では、両被験者とも安静滞在時の変化はなかったが、CV条件におけるSCIの ΔT_{ty} は、ABと比較すると約2倍の上昇を示し、回復期においてもABと比較して高値を維持した。Com条件における ΔT_{ty} では、SCIとABの間に大差なかったが、回復期においてSCIの低下率はABに比して緩やかであった。また、 T_{skin} はCVおよびCom両条件において、SCIと

ABが同様の变化を示した。

4 考察

本研究は、体温調節障害を有する高位脊髄損傷者における暑熱曝露に対する身体冷却が、深部体温である直腸温、鼓膜温および皮膚温上昇抑制に及ぼす効果について検討することを目的とした。SCIの T_{re} および T_{ty} は、屋外での暑熱環境に曝露されてから著しく上昇した。すべての条件でABの T_{skin} は外気温と同じ温度までの上昇にとどまったが、ISおよびCV条件においてSCIは外気温よりも高値を示した。また、SCIにおいては、深部体温および皮膚表面温が冷涼な環境に戻っても健常者と比較すると高体温を維持したが、TSは同じレベルで推移した。Com条件では、SCIの深部体温および T_{skin} の変動がABと大差なく推移した。

ヒトの深部体温は熱放散と熱産生によって約37℃に維持される。しかしながら、脊髄損傷者は、主たる熱放散の機序である発汗作用と血管運動障害によって、暑熱下における体温調節が難しい。本研究のSCIの被験者は、頸椎(C5)損傷者であった。発汗可能な場所は、顔面と上背部のみであり、麻痺部が四肢にわたることから血管拡張も起こらない。Ramanathan法による平均皮膚温の算出は、上腕部、胸部、大腿部および腓腹部の4点であり、いずれの箇所からも発汗がないことから、環境温に依存して T_{mean} が著しく上昇した。特に上腕部と胸部では、輻射熱の影響を大きく受けたことで約40℃であった。冷涼な部屋に戻っても健常者と比較すると高値を維持したが、体外冷却法であるCVを着用し、直達日射を遮ることによって、皮膚温の過度な上昇を抑制することができ、健常者と大差なく滞在することが可能になった。

脊髄損傷者に対する身体冷却は、健常者と同様の体内冷却と体外冷却を応用することができるが、障害の程度によっては体温の保持が困難になっていることがあるため、そのまま適応させることには注意が必要である。脊髄損傷者の車いすラグビーの選手を対象とした研究では、6.8g/kgのISを運動前に

摂取させ、運動開始後30分まで深部体温の急激な上昇を抑制したことが報告されている(Forsyth et al. 2016)。これらは車椅子スポーツのトップレベルの選手を対象とした研究であり、脊髄の損傷部位が低く運動時の熱産生が大きいことから、実践活用することができた。しかしながら高位損傷者にそのまま適応すると低体温や凍傷を惹起する可能性がある。頸椎損傷者に対するISの摂取量は先行研究がなく、少量からの開始が望ましいと考えられ、本研究ではISの摂取を3g/kgとした。経口摂取をする際に頸部の冷却を伴うことから、 T_{ty} が顕著に低下したが、 T_{re} を低下させる量としては不足していた。消化器の機能も低下していることが考えられることから、非運動時のISの大量摂取は困難であることを考慮すると、暑熱曝露前のIS摂取は適切ではない。

体外冷却は、冷水浴や、手掌部・足部の冷却、CVが活用されているが、日常生活を考慮すると、CVが簡便で一般的に実施しやすい(内藤と林 2018)。Webborn et al. (2005, 2010)は脊髄損傷者を対象にハンドエルゴメーター運動時のCV着用が深部体温の上昇抑制に貢献したことを報告している。また、Griggs et al. (2015)もCVと水スプレーとの併用が深部体温の上昇抑制に効果的であることを示している。本研究においても、発汗場所が著しく限定される対象者に対し、皮膚表面からの体温低下を促すCVの着用は効果的であったが、さらに直達日射を遮ることで皮膚温の上昇も抑制できた。したがって、麻痺部が大きく発汗による熱放散が制限される者にとって、皮膚直接的な冷却と直達日射からの保護の組み合わせが、 T_{skin} の上昇とそれに伴う T_{mean} 上昇も抑制できることが示唆される。これは脊髄損傷脊髄損傷者における日常的に使用することができる方略であり、暑熱下での屋外の活動制限を大きく改善させる可能性を有するかもしれない。しかしながら、CVに挿入する保冷剤の個数は注意を要する。高位損傷では麻痺部が大きく、皮膚が弱くなっている面積が大きいことから、保冷剤を健常者と同様の数を入れると、背部の保冷剤の突起等が部分的に皮膚を圧迫し患部を憎悪させる可能性がある。また、感覚麻痺もあることから凍傷のリスクも高い。したがって、

背部への保冷剤の装着をなくすか、タオル等をCVと衣服の間に挟み過度な冷却を予防する、保冷剤が平坦になるように冷凍方法に留意する、定期的に皮膚の観察を行うなどの措置を講ずる必要がある。ただし、腰部よりも上位の感覚麻痺等が無い脊髄損傷者においては、健常者と同数量を装着できよう。

実験の手法として、これまで深部体温の測定は主に直腸温や、食道温、鼓膜温が採用されてきた。しかしながら高位損傷者においては、身体背部を這うコード類が存在すると褥瘡を憎悪させる可能性が高く、長時間にわたる実験には適さないことが考えられた。また、暑熱環境に曝す場合、水分補給を適宜実施することから食道温も適切でない。多くの海外の研究では、カプセル上の体温計を使用することで胃腸内の体温を測定することが可能になってきているが、本邦では薬機法（略称）による制限と排便のコントロールをしている対象者が多いことから使用できない。したがって鼓膜温を採用するか、信頼性と妥当性を検証が必要であるが皮膚表面貼付型の機器を使用する必要がある。

5 まとめ

暑熱環境下における頸椎損傷者に対する深部体温の上昇抑制に有効な身体冷却は、CVまたはCVと直達日射を防ぐ衣類の着用や日傘、タープを併用することが効果的であることが示唆された。また今度の研究として検討していく暑熱対策は、冷却水やアイススラリーなどの飲料よりもCV着用と輻射熱を減弱させる方法が日常生活の中で活用しやすく、望ましいことが考えられた。脊髄損傷者の多くが体温調節障害を有し、夏季または冬季における屋外での活動が著しく制限を受ける。脊髄損傷者の種々の環境における体温の変動を明らかにし、適切な対策を講じることで屋外での活動時間を延長させ、QOLの向上に寄与する可能性が考えられる。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP18K17826の助成を受けたものである。

引用文献

- Attia M, and Engel P. 1983. Thermoregulatory set point in patients with spinal cord injuries (spinal man). *Paraplegia*, 21: 233-248.
- Byrne C, Owen C, Cosnefroy A, and Lee JK. 2011. Self-paced exercise performance in the heat after pre-exercise cold-fluid ingestion. *J Athl Train.*, 46: 592-599.
- Forsyth P, Pumpa K, Knight E, and Miller J. 2016. Physiological and perceptual effects of precooling in wheelchair basketball athletes. *J Spinal Cord Med.*, 39: 671-678.
- Gemmer H. J, Engel P, Gass GC, Gass EM, Hannich T, and Feldmann G. 1992. The effects of sauna on tetraplegic and paraplegic subjects. *Paraplegia*, 30: 410-419.
- Goosey-Tolfrey V, Diaper N. J, Crosland J, and Tolfrey K. 2008a. Fluid intake during wheelchair exercise in the heat: effects of localized cooling garments. *Int J Sports Physiol Perform.*, 3: 145-156.
- Goosey-Tolfrey V, Swainson M, Boyd C, Atkinson G, and Tolfrey K. 2008b. The effectiveness of hand cooling at reducing exercise-induced hyperthermia and improving distance-race performance in wheelchair and able-bodied athletes. *J Appl Physiol.*, 105: 37-43.
- Griggs KE., Price MJ., and Goosey-Tolfrey VL. 2015. Cooling athletes with a spinal cord injury. *Sports Med.*, 45: 9-21.
- Guttman L, Silver J, Wydham, CH. 1958. Thermoregulation in spinal man. *J Physiol*, 142: 406-419.
- Lee JK, Shirreffs SM, and Maughan RJ. 2008. Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat. *Med Sci Sports Exerc.*, 40: 1637-1644.
- Muraki S, Yamasaki M, Ishii K, Kikuchi K, and Seki K. 1995. Effect of arm cranking exercise on skin blood flow of lower limb in people with

- injuries to the spinal cord, *Eur J Appl Physiol.*, 71: 28-32.
- Muraki S, Yamasaki M, Ishii K, Kikuchi K, and Seki K. 1996. Relationship between temperature and skin blood flux in lower limbs during prolonged arm exercise in person with spinal cord injury. *Eur J Appl Physiol.*, 72: 330-334.
- Petrofsky JS. 1992. Thermoregulatory stress during rest and exercise in heat patients with a spinal cord injury. *Eur J Appl Physiol.*, 64: 503-507.
- Pollock LJ, Boshes B, Chor H, Finkelman I, Arief AJ, and Brown M. 1951. Defects of regulatory mechanisms of autonomic function in injuries to spinal cord. *J Neurophysiol.*, 14: 85-93.
- Yamasaki M, Shimokawa M, Choi SW, and Muraki S. 2000. Effect of acute heat exposure on skin blood flow of the paralyzed thigh in persons with spinal cord injury. *Spinal Cord*, 38: 224-228.
- Webborn N, Price MJ, Castle PC, and Goosey-Tolfrey VL. 2005. Effects of two cooling strategies on thermoregulatory responses of tetraplegic athletes during repeated intermittent exercise in the heat. *J Appl Physiol.*, 98: 2101-2107.
- Webborn N, Price MJ, Castle P, and Goosey-Tolfrey VL. 2010. Cooling strategies improve intermittent sprint performance in the heat of athletes with tetraplegia. *Br J Sports Med.*, 44: 455-460.
- 内藤貴司, 大柿哲朗. 2015. 高温環境下における運動パフォーマンス低下の抑制に有効な運動前冷却方略. *九州体育・スポーツ学研究*, 30: 23-33.
- 内藤貴司, 林聡太郎. 2018. 脊髄損傷者の体温上昇抑制に有効な身体冷却法の検討. *体育学研究*, 63: 1-11.

Effects of body cooling in a hot environment on core and skin temperature in spinal cord injury person —Measures to prolong outdoor activity time—

Sotaro HAYASHI, Yasuko ISHIMOTO

Abstract

Spinal cord injury (SCI) patients with central nervous system injury have sympathetic dysregulation and impaired thermoregulation below the injury site. The purpose of this study was to establish an experimental method to examine the effect of body cooling on the suppression of skin temperature rise in the deep body temperatures of rectum, tympanic membrane, and outer shell in high-level spinal cord injured subjects with thermoregulatory disorders. In the IS, T_{mean} increased markedly depending on the environmental temperature and remained high compared to healthy subjects even after returning to a cool room, while CV suppressed the excessive increase in skin temperature. This suggests that direct skin cooling combined with protection from direct solar radiation can suppress the rise in T_{skin} and the associated rise in T_{mean} in people with large paralyzed areas and limited heat dissipation through perspiration. This could greatly improve the limitation of outdoor activities in the heat for people with SCI. It is thought that wearing a cooling vest and reducing radiant heat are more desirable than drinking cooling water or ice slurry, as they are easier to use in daily life.

Keywords : spinal cord injury, core temperature, heat environment, body cooling

DOI : 10.15096 / UrbanManagement.1416