

屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱が 身体冷却リカバリ一時の体温動態に及ぼす影響

北海学園大学 内藤 貴司
(共同研究者) 福山市立大学 林 聡太郎
鳥取大学 斎藤 辰哉
久留米大学 大橋 充典
姫路獨協大学 大谷 秀憲

The effects of High Solar Radiation during Exercise on Body Temperature Responses during Body Cooling Recovery in Hot Outdoor Environments

by

Takashi Naito
Hokkai-Gakuen University
Sotaro Hayashi
Fukuyama City University
Tatsuya Saito
Tottori University
Mitsunori Ohhashi
Kurume University
Hidenori Otani
Himeji Dokkyo University

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effect of body cooling with the fan cooling jacket on body temperature responses during recovery after exercise when exposed to high solar radiation in an outdoor hot environment. Nine healthy male

subjects cycled using ergometer until their rectal temperature increased to 38.50°C in hot outdoor environments (31-35°C, 48-65% relative humidity, and 950-1150 W/m² solar radiation), followed by body cooling recovery in warm indoor environments (28-31°C room temperature and 50-60% relative humidity). Subjects repeatedly performed the cycling exercise protocol, which consisted of one set of 5 min at a load of 1.5 watt/kg body weight and 15 min at a load of 2.0 watt/kg body weight at 60 rpm. Body cooling recovery consisted of cold water ingestion (10°C : CON) or cold water ingestion + the use of the fan cooling jacket (FAN) in random order until the rectal temperature decreased to 37.75°C. The time for the rectal temperature to reach 38.5°C did not differ between the two trials. The rate of decrease in rectal temperature at recovery tended to be higher in FAN trial than in CON trial (P = 0.082). The rate of decrease in ear canal temperature was higher in FAN trials than in CON trials (P = 0.002). The rate of decrease in mean skin temperature at the first 20 min of recovery was higher in FAN than in CON trial (P = 0.013). Body cooling recovery with the fan cooling jacket in addition to cold water ingestion may be effective in reducing elevated ear canal and skin temperatures during exercise in the heat under a clear sky, but may be difficult to decrease rectal temperature.

キーワード

送風冷却, 晴天, 直腸温, 外耳道温, 高体温

Keyword

fan cooling condition, clear sky, rectal temperature, ear canal temperature, hyperthermia

要 旨

本研究の目的は屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、ファン付きジャケットによる身体冷却がリカバリー時の体温動態に及ぼす影響を検討することであった。健康男性9名が気温31-35°C、相対湿度48-65%、日射量950-1150 W/m²の環境下で直腸温が38.50°Cに上昇するまで自転車運動を行い、その後室温28-31°C、相対湿度50-60%の環境下で身体冷却リカバリーを実施した。自転車運動のプロトコルは回転数60 rpmで体重1 kg当たり1.5 wattの負荷で5分、2.0 wattの負荷で15分を1セットとし、これを反復した。身

体冷却リカバリーは冷水摂取(10°C : CON)もしくは冷水摂取+ファン付きジャケット(FAN)をランダムな順で用い、直腸温が37.75°Cに低下するまで実施した。リカバリー時の直腸温における1分毎の低下率は、FAN試行がCON試行よりも高い傾向にあった。外耳道温における低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高く、平均皮膚温では冷却開始20分間の低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高かった。冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーは、運動中の高輻射熱によって上昇した外耳道温や平均皮膚温を低下させるのには有効であるが、直腸温の低下を導くのは難しいかもしれない。

緒言

暑さを決定する要因は、気温や湿度に加えて屋外では気流や日射量（以下：輻射熱）がある。日本スポーツ協会¹⁾は湿球黒球温度（Wet-Bulb Globe Temperature, 以下：WBGT）を暑さ指数として発表しており、WBGTは「WBGT (°C) = 0.7 × 湿球温度（湿度の指標） + 0.2 × 黒球温度（輻射熱の指標） + 0.1 × 乾球温度（気温）」で算出されている。この公式から輻射熱は気温よりも係数が2倍あり、暑さを決める重要な要因の一つと考えられるが、屋外で輻射熱の要因を含んだ検討はあまりなされてこなかった。

これまでに運動中の高輻射熱は深部体温の上昇に加えて皮膚温の上昇も惹起し、持久性運動能力の低下を明らかにしている^{2,3)}。過度な皮膚温の上昇は深部体温との温度較差を狭くするため、熱が体外へ逃げづらくなり、運動終了後も高体温が維持される⁴⁾。運動後に体温低下のリカバリーを行わずに、過度な体温上昇を放置しておくこと熱中症を誘発する可能性もある。したがって、高輻射熱を含む暑熱環境下での運動後はそれを抑えるための暑熱対策を講じる必要があり、その方法の一つに身体冷却がある。

運動後の身体冷却リカバリーにおいて、体温低下の観点から最も有用な方法は冷水浸水である⁵⁾。冷水浸水は急速に深部体温および皮膚温を冷却でき、多くのシステマティックレビューにおいて冷却効果が明らかにされている。しかし、この方法には多量の冷水や氷が必要であり、大規模な大会以外での使用は難しい。一般のスポーツ愛好家では、簡便な方法である冷水摂取が広く用いられている。この方法は深部体温の低下には有効であるが、皮膚温の低下への影響は小さいことが示されている⁶⁾。そこで本研究では、高輻射熱を伴う運動後の身体冷却リカバリーでは冷水摂取による体内冷却に加えて、簡便に皮膚温を低下させ

る送風による体外冷却を組み合わせる方法を考えた。送風冷却は気流によって蒸発性熱放散を促進し、深部体温や皮膚温の上昇を抑制する有効な方略と示されている⁷⁾。近年は、背部にファンが搭載された外気通風式の衣服（以下：ファン付きジャケット）が市販され、生涯スポーツ分野においても簡便に送風冷却を取り入れることができる。ファン付きジャケットの運動中や運動間の使用は鼓膜温や平均皮膚温の上昇を抑制すると報告されている^{8,9)}。しかし、高体温からのリカバリーでは検討されておらず、高輻射熱下での運動によって過度に上昇した深部体温や皮膚温をより急速に低下させるかは不明である。

本研究の目的は、屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却がリカバリー時の体温動態に及ぼす影響を検討することであった。

1. 方法

1.1 被験者

被験者は、健常男性9名（年齢 = 21 ± 1 歳、身長 = 1.709 ± 0.045 m、体重 = 64.73 ± 6.38 kg）であった。彼らはアスリートでは無かったが、日常的に運動習慣のある被験者であった。また、いずれの被験者も常用薬を服用しておらず、何ら心臓血管系及び呼吸器系の疾病歴を有していなかった。彼らには本研究の目的、方法、危険性等を十分に説明し、被験者全員から実験に参加することに同意を得た。本研究は、福山市立大学（承認番号：2021003）および久留米大学研究倫理審査委員会（承認番号：2021429）の承認を得て実施した。

1.2 実験デザイン

本研究では、屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、リカバリー時のファン付きジャケットの着用が種々の体温関連項目の低下に寄与するか否かを検討するため、ランダム化比較

試験を行った。全ての被験者は、運動後のリカバリー時において1) 冷水 (10℃) を摂取する試行 (CON) と2) 冷水に加えてファン付きジャケットを着用する試行 (FAN) の2試行を行った。

1. 3 実験プロトコル

本実験は各試行4日以上の間隔をあけ、ランダムで実施した。また、全ての実験は体温調節応答に対する太陽高度角¹⁰⁾と日内変動を考慮し、8月中の午前10時から開始された。各被験者は実験前日より激しい運動やアルコール、カフェイン等の栄養サプリメント摂取が制限された。彼らは実験の2時間前に500 mLの水分を摂取し、それ以降は絶食をした。実験室 (25℃, 相対湿度50%) に到着し30分以上安静後、半袖シャツ、短パンと運動靴 (総重量は約1.3 kgであり、衣服面積比 (着衣と裸体の体表面積比率) は1.12, 衣服熱抵抗は $0.063 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{C})$ または 0.405 clo , 衣服蒸発性熱抵抗は $0.010 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$) に着替えた¹¹⁾。採尿、身長および体重を測定した後、測定器具を装着した。その後被験者は屋外暑熱下 (表1) に移動し、太陽に向かって方位角 (太陽に対する身体の向き) を 0° に設定された自転車エルゴメーターの上で5分間の安静をとった¹²⁾。自転車運動は回転数を60 rpmとし、体重1 kg当たり

1.5 kpの強度で5分、2.0 kpの強度で15分を1セットとし、直腸温が38.50℃に到達するまでセットを反復した。試験中に半径100 m以内に太陽光を遮るものはなかった。運動終了後、日陰を想定した屋内温暖環境下 (表1) に移動し、リカバリーとして座位安静にて直腸温が37.75℃に達するまで身体冷却介入を行なった。リカバリー終了後は汗を十分拭き取り、体重測定および採尿を行った。

1. 4 身体冷却介入

冷水摂取は10℃の市販のスポーツ飲料 (Aquarius, 日本コカ・コーラ社製) を用い、体重1 kg当たり2.0 gの量を10分毎に摂取した。ファン付きジャケットは先行研究において使用された市販のジャケット (エアコンディショニングウェア, アシックス社製) を用いた。このジャケットはポリエステル (100%) でできており、背中下部にある2つの小型ファンから外気を取り込み、袖口および頸部から排気する仕組みである。FAN試行においてジャケットは運動終了後半袖シャツの上から着用された。

1. 5 測定項目

尿比重は実験前後に採尿を行い、デジタル尿比重屈折計 (PAL-09S, アタゴ社製) を用いて測

表1 Body heat gain from the sun (SHG), heat loss, the projected area and environmental conditions at the end of exercise in outdoor and during recovery period in indoor

	Outdoor (Exercise)		Indoor (Recovery)	
	CON	FAN	CON	FAN
SHG (W/m^2)	93.6 ± 17.8	102.4 ± 19.8		
Dry heat loss (W/m^2)	-81.6 ± 23.5	-82.8 ± 19.1		
Evaporative heat loss (W/m^2)	179.9 ± 29.3	182.4 ± 34.8		
Total heat loss (W/m^2)	98.5 ± 38.3	99.5 ± 43.1		
Project area (%)	22.4 ± 1.4	22.6 ± 1.3		
Global solar radiation (W/m^2)	1101 ± 40	1107 ± 22		
Mean radiant temperature ($^\circ\text{C}$)	67.9 ± 6.8	68.5 ± 5.5		
Ambient temperature ($^\circ\text{C}$)	32.9 ± 1.8	33.1 ± 1.8	30.0 ± 1.7	30.1 ± 1.8
Relative humidity (%)	50.0 ± 8.0	49.9 ± 8.1	57.6 ± 6.9	57.2 ± 7.1
Air velocity (m/sec)	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1
WBGT ($^\circ\text{C}$)	30.0 ± 0.9	30.2 ± 1.0	26.6 ± 0.7	26.6 ± 0.8

Values are means ± SD. CON, no-cooling condition, FAN, wearing fan cooling jacket, WBGT, wet-bulb globe temperature *CON vs. FAN ($P < 0.05$)

定した。体重は、市販の体重計 (BC-316, タニタ社製) を使用した。直腸温は、潤滑剤を塗ったサーミスタカテーテル (ITP010-11: 日機装サーモ社製) を直腸内に 15 cm 挿入した。上腕部, 胸部, 大腿部および下腿部の 4 点にボタン型温度記録計 (ITP082-24: 日機装サーモ社製) を装着し, その上をサージカルテープで覆った。外耳道温は耳栓型サーミスタ温度プローブ (400EP23: 日機装サーモ社製) を用いて測定した。心拍数は無線式携帯型心拍計 (H-10, Polar 社製) を胸部に装着し, 30 秒毎に記録した。温熱感覚は 9 段階スケール¹³⁾ で 5 分毎に記録した。主観的運動強度 (Rating of perceived exertion: RPE) は Borg (1982)¹⁴⁾ の 15 段階スケールを用いて 5 分毎に記録した。

1. 6 算出項目

本研究では熱吸収量や熱放散量を算出するため, 下記の公式を用いた。

日射による熱吸収量 (W) = 体表照射面積 × 皮膚の日射吸収率 × $\frac{\text{全天日射量}}{\sin \text{日射角度}} - \frac{\text{散乱日射量}}{2 \sin \text{日射角度}}$ + 有効放射面積 (体表面積 - 着衣面積) × 皮膚の日射吸収率 × $\frac{\text{散乱日射量}}{2}$ ¹⁵⁾

有効放射面積は座位のため 0.7 とした¹⁶⁾。着衣面積は体表面積の 14% と仮定した¹²⁾。

体表照射面積 (m^2) = $0.043 \sin \text{日射角度} + 2.997 \cos \text{日射角度} \sqrt{0.02133 \cos^2 \text{方位角} + 0.0091 \sin^2 \text{方位角}}$ ¹²⁾

体表面積 = $0.202 \text{体重}^{0.425} \times \text{身長} (m)^{0.725}$ ¹⁷⁾

対流移動係数 = $8.3 \times \text{風速} (m/sec)^{0.6}$ ¹⁶⁾

放射熱移動係数 = 4×0.95 ¹⁵⁾ × ステファン-ボルツマン定数 × 有効放射面積 ($237.2 + (\text{平均衣服表面温} + \text{平均放射温}) / 2$)³¹⁶⁾

ステファン-ボルツマン定数は 5.67×10^{-8} とした。平均衣服表面温は iteration 法で算出した¹⁶⁾。

平均放射温 ($^{\circ}C$) = $[(\text{黒球温} + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times \text{風速}^{0.6} (\text{黒球温} - \text{気温})]^{0.25} - 273$ ¹⁸⁾

乾性熱移動係数 = 対流熱移動係数 + 放射熱移動係数¹⁶⁾

非蒸発性熱放散量 = $(\text{平均皮膚温} - \text{作用温度}) / (\text{衣服性熱抵抗} + (1/\text{衣服面積比} + \text{乾性熱移動係数}))$ ¹⁶⁾

作用温度 = $(\text{放射熱移動係数} \times \text{平均放射温} + \text{対流の移動係数} \times \text{気温}) / (\text{放射熱移動係数} + \text{対流熱移動係数})$ ¹⁶⁾

蒸発性熱移動係数 = $16.5 \times \text{対流熱移動係数}$ ¹⁶⁾

蒸発性熱放散量 = $(\text{皮膚の濡れ率} (\text{皮膚の水蒸気圧} - \text{空気の水蒸気圧}) / (\text{衣服蒸発性熱抵抗} + (1/\text{衣服面積比} \times \text{蒸発性熱移動係数}))$ ¹⁶⁾

飽和水蒸気圧 = $0.1 \exp (18.956 - 4030.18 / (\text{乾球温度} + 235))$ ¹⁶⁾

空気の水蒸気圧 = 飽和水蒸気圧 × 相対湿度¹⁶⁾

総熱放散量 = 非蒸発性熱放散量 + 蒸発性熱放散量¹⁶⁾

加えて平均皮膚温, 直腸温および各体温の冷却率, 総発汗量を算出するために, 下記の公式を用いた。

平均皮膚温 ($^{\circ}C$) = $0.3 \times \text{胸部皮膚温} + 0.3 \times \text{上腕部皮膚温} + 0.2 \times \text{大腿部皮膚温} + 0.2 \times \text{下腿部皮膚温}$ ¹⁹⁾

直腸温の冷却率 ($^{\circ}C / \text{min}$) = $(\text{運動終了時の直腸温} - 37.75^{\circ}C) / \text{時間} (分)$

各体温の冷却率 ($^{\circ}C / \text{min}$) = $(\text{運動終了時の温度} - \text{リカバリー終了時の温度}) / \text{直腸温冷却率の時間} (分)$

各体温の前半 20 分の冷却率 ($^{\circ}C / \text{min}$) = $(\text{運動終了時の温度} - \text{リカバリー終了時の温度}) / 20$

総発汗量 (kg) = $\text{運動後の体重} - \text{運動前の体重} - \text{飲水量}$

1. 7 統計処理

結果は, 全て平均値 ± 標準偏差値で示した。全ての統計処理は, SPSS のバージョン 28 (Statistical package for social science: IBM 社製) を用いて行った。データの正規性と試行間の等分散性は, それぞれ Shapiro-Wilk の検定と Levene の検定を用

いて検定した。Shapiro-Wilkの検定またはLeveneの検定の結果が有意水準より低い場合、データはノンパラメトリック検定を使用して分析された。ノンパラメトリックデータ（主観的指標）は、Friedmanの二元配置分散分析を用いて分析した。有意差が認められた場合および環境データは、Wilcoxonの符号付順位検定を用いて比較した。運動前後の体重および尿比重、体温や心拍数などの生理学的指標は繰り返しのある2要因（試行×時間）分散分析（Two-way repeated ANOVA）を用いた。有意な交互作用が認められた場合および運動時間、直腸温や各体温の冷却率、総発汗量は対応のあるt検定によって比較した。多重比較検定にはBonferroni法を用いた。

2. 結果

運動時間はCON試行で36分42秒±12分31秒、FAN試行で34分34秒±13分29秒で有意な差は

なかった（ $P = 0.677$ ）。リカバリー時における冷却時間はCON試行で43分54秒±5分43秒、FAN試行で40分02秒±10分53秒で有意な差はなかった（ $P = 0.145$ ）。

2. 1 環境条件

各試行の運動およびリカバリー時の環境条件は表1に示した。環境条件指標、日射による熱吸収および熱放散において2試行間で有意な差は認められなかった。

2. 2 体温調節指標

各試行の運動終了時における直腸温、外耳道温および平均皮膚温に有意な差は認められなかった。リカバリー時における直腸温は2試行間で有意な差は認められなかった（図1A）。一方で、外耳道温はリカバリー開始10-20分目（図1B）、平均皮膚温は15および20分目でFAN試行がCON

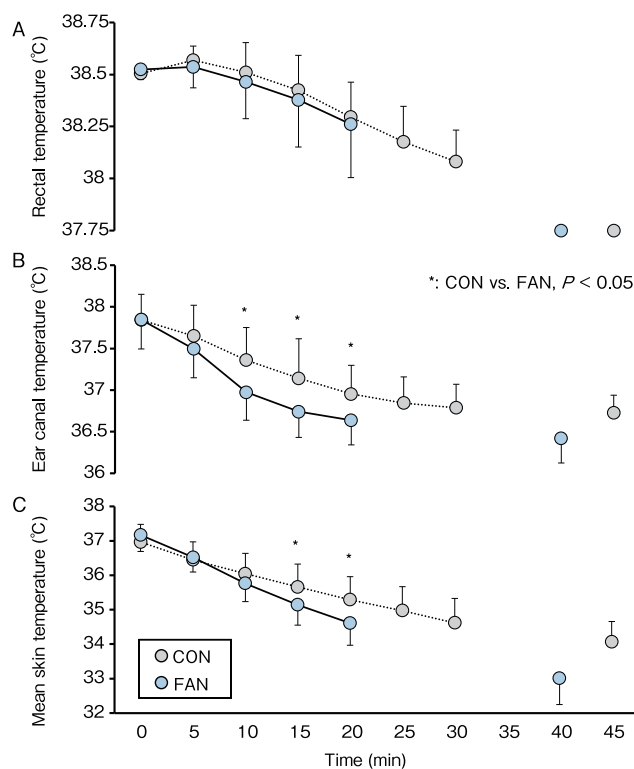


図1 The rectal (A), ear canal (B), and mean skin temperatures (C) during recovery period

試行よりも有意に低い値を示した ((図1C; $P < 0.05$)).

2. 3 各体温の冷却率

リカバリー時における直腸温, 外耳道温および平均皮膚温の冷却率は表2に示した. リカバリー時における直腸温の低下率はFAN試行がCON試行よりも高い傾向があった ($P = 0.082$) が, 前半20分の冷却率は2試行間で有意な差はなかった. 外耳道温の低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高く ($P = 0.001$), 前半20分の冷却率も同様であった ($P = 0.002$). 平均皮膚温の低下率は2試行間で有意な差はなかったが, 前半20分の冷却率FAN試行がCON試行よりも有意に高かった ($P = 0.013$).

2. 4 体水分状態

各試行における運動前後の体重および尿比重には, 有意な差はなかった. リカバリー中の飲料摂取量, 脱水率および総発汗量も2試行間で差は認められなかった (表3).

2. 5 主観的指標

各試行の運動終了時における温熱感覚および主観的運動強度に有意な差は認められなかった. 温熱感覚は, リカバリー開始5-20分目においてFAN試行がCON試行よりも有意に低い値を示した (図2A; $P < 0.05$). 主観的運動強度は, リカバリー開始10-15分目においてFAN試行がCON試行よりも有意に低い値を示した (図2B; $P < 0.05$).

2. 6 心拍数

各試行におけるリカバリー時の心拍数は, 2試行間で有意な差は認められなかった.

3. 考 察

本研究の主な知見は, 屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後, 冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却はリカバリー時の①直腸温の冷却率を高める傾向にあったが, 着用しない場合と有意な差はなかった. 一方で, ②外耳道温および平均皮膚温の冷却率を向上させた. 加えて, ③主観的指標はファン付きジャケット

表2 Cooling rate in each body temperature variable during recovery period

		Time to achieve Tre of 37.75°C	First 20 min of recovery period
Rectal temperature (°C/min)	CON	0.017 ± 0.002	0.010 ± 0.003
	FAN	0.021 ± 0.005	0.013 ± 0.004
Ear canal temperature (°C/min)	CON	0.024 ± 0.010	0.044 ± 0.017
	FAN	0.037 ± 0.013*	0.060 ± 0.014*
Mean skin temperature (°C/min)	CON	0.061 ± 0.014	0.084 ± 0.033
	FAN	0.170 ± 0.193	0.128 ± 0.033*

Values are means ± SD. CON, no-cooling condition, FAN, wearing fan cooling jacket, Tre, rectal temperature
*CON vs. FAN ($P < 0.05$)

表3 Body composition during experimental trials

		CON	FAN
Body mass (kg)	PRE	64.73 ± 6.5	65.01 ± 6.1
	POST	64.14 ± 6.3	64.44 ± 6.0
Urine specific gravity	PRE	1.018 ± 0.009	1.023 ± 0.009
	POST	1.025 ± 0.009	1.024 ± 0.006
Ingestion volume (kg)		0.532 ± 0.101	0.508 ± 0.143
Dydration (%)		0.89 ± 0.64	0.88 ± 0.85
Total sweating volume (kg)		-1.12 ± 0.49	-1.08 ± 0.50

Values are means ± SD. CON, no-cooling condition, FAN, wearing fan cooling jacket, PRE, pre-exercise, POST, post-exercise
*CON vs. FAN ($P < 0.05$)

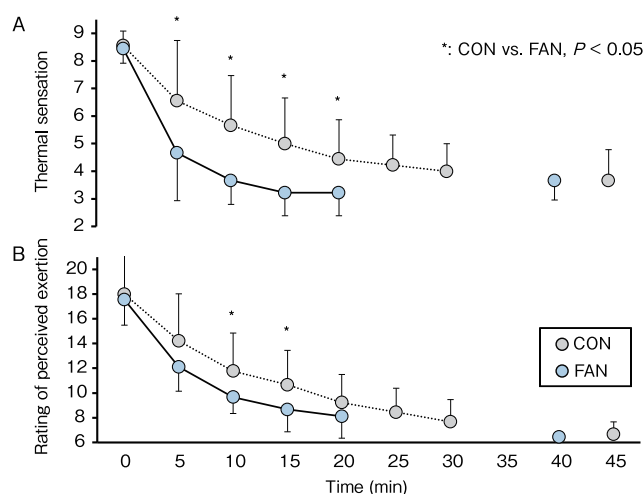


図2 The thermal sensation (A) and rating of perceived exertion (B) during recovery period

トの使用によって早期に改善されたことが明らかとなった。

気温、湿度、風速や輻射熱は深部体温や平均皮膚温などの体温動態を変容させ、持久性運動能力に影響を及ぼす。また、これらの環境条件指標が複合的に合わさった場合も、相乗・相加効果で体温動態を変容させ、持久性運動能力の悪化を誘発する²⁰⁾。本研究の日射からの熱吸収や環境条件指標において2試行間で有意な差はなかった。したがって、本研究は2試行ともに同条件で行えたため、運動時間や運動終了時の種々の体温には差が生まれなかったと考えられる。

本研究ではリカバリー時の身体冷却として有用である冷水浸水ではなく、スポーツ愛好家でも使用しやすい市販のファン付きジャケットを用いた。その中で、FAN 試行におけるリカバリー時の直腸温の低下率は $0.021 \pm 0.002^\circ\text{C} / \text{min}$ でCON 試行と差はなかった。この値は労作性熱中症への治療として推奨されている $0.15^\circ\text{C} / \text{min}$ やクーリングベストによる冷却の $0.06 \pm 0.02^\circ\text{C} / \text{min}$ ²¹⁾よりも低値となった。上記の推奨値や先行研究の結果とは異なる要因として、リカバリー時の気温と皮膚温の関係や熱移動が関連していると考えられ

る。リカバリー時の気温が皮膚温よりも低く、気温と皮膚温の温度較差が大きいほど対流によって熱放散が増加するが、本研究の気温は日陰でのリカバリーを想定し、室内は約 30°C あった。平均皮膚温が運動中の高輻射熱暴露によって上昇したことに加えて、冷房の効いた環境下ではなく温暖な環境下でリカバリーを実施したため、低下率は低かったと考えられる。加えて、Barwood et al. (2009)⁷⁾は、ファン付きジャケットは全身送風よりも冷却される表面積が小さいため冷却力の乏しさを指摘している。実際に、上記の先行研究ではリカバリー時の全身送風は送風なしと比較して有意に直腸温を低下させる。一方でファン付きジャケットでは差がなかった。ファン付きジャケットは簡便な冷却装置であるが、輻射熱を含む屋外暑熱下での運動後、リカバリーとして直腸温を低下させることは冷却力の点では困難かもしれない。

外耳道温では、FAN 試行がCON 試行よりもリカバリー時において有意に高い冷却率であった。これは運動間や短時間のリカバリー時に鼓膜温を指標とし、ファン付きジャケットを用いた先行研究⁹⁾と同様の結果となった。深部体温において鼓

膜温は直腸温よりも低値を示すことや応答が早いことが知られている²²⁾。本研究ではファン付きジャケットによる冷却の効果が鼓膜に近い外耳領域で早期に反映されたことによる可能性が考えられる。加えて、ファン付きジャケットによる送風は頸部の前後を通過する⁹⁾ことから、外耳領域や頸部などが冷却され、その領域から伝導熱によって低下した可能性がある。

平均皮膚温はFAN試行ではリカバリー前半20分時にCON試行に比べて有意に高い冷却率であったが、リカバリー全体では差はなかった。ファンにおける身体冷却は皮膚表面に分泌された汗を空気の動きを高めることで蒸発させ、熱放散を促進させる²³⁾。本研究では局所発汗量の測定は行っていないが、リカバリー前半20分時には汗が皮膚表面に分布した(湿度度が高い)が、後半はそれがなくなったため熱放散の促進に至らなかったことが要因の一つとして考えられる。加えて、ファン付きジャケットはファンから外気を取り入れ、対流を起こすことで着衣と皮膚の間に空気の層を作る²⁴⁾。本研究では衣服内温度を測定していないが、衣服内の高温・多湿の空気が衣服外へ排出され、平均皮膚温の低下に寄与したことが推察された。一方でリカバリー全体の皮膚温の冷却率は個人差が大きかった。汗の分泌がリカバリー後半時にも起こっていた被験者もいた可能性がある。今後は局所発汗量の測定を併用し、行う必要がある。我が国の夏季は高温多湿下であり、汗は蒸発せずに皮膚に多く分布する。その中で、ファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーは熱放散を促進し、輻射熱暴露によって上昇した皮膚温を低下させるのに有用な方略であることを示した。

本研究の結果はリカバリー時のファン付きジャケット着用は屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後、早期に熱負荷を減らし、心拍数は同程度であったが疲労感や温熱感の低下を誘発す

るのに効果的な方法であることを示した。ファン付きジャケットや送風冷却の研究はラボ研究がほとんどであり、高輻射熱下での検討は先行研究で課題として挙げられていた^{9,23)}。本研究の知見はアスリートに限らず、特別な機器を有していないスポーツ愛好家においても高輻射熱暴露後の主観的指標の改善により良い選択肢をもたらした。

4. 結 論

本研究ではファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーに着目し、屋外暑熱環境下における運動中の高輻射熱暴露後にジャケットの有無によって種々の体温関連項目に及ぼす影響を検討した。その結果、ファン付きジャケットの使用はリカバリー時の直腸温における1分毎の低下率は、FAN試行がCON試行よりも高い傾向にあったが有意な差は認められなかった。外耳道温における低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高く、平均皮膚温では冷却開始20分間の低下率はFAN試行がCON試行よりも有意に高かった。したがって、冷水摂取に加えたファン付きジャケットによる身体冷却リカバリーは、運動中の高輻射熱によって上昇した外耳道温や平均皮膚温、主観的感覚を低下させるのには有効であるが、直腸温の低下を導くのは難しいかもしれない。

謝 辞

実験に協力して下さった久留米大学の学生の皆様に感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、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心よりお礼申し上げます。

文 献

- 1) 日本スポーツ協会. スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック. 1-56(2019)
- 2) Otani H., Kaya M., Tamaki A., Watson P., Maughan R.J. Effects of solar radiation on endurance exercise

- capacity in a hot environment. *Eur. J. Appl. Physiol.* 116 (4) :769-79(2016)
- 3) Naito T., Saito T., Muraishi K., Takahashi H. Comparison of the effects of high and low levels of solar radiations on exercise capacity in hot outdoor environments. *J. Sports Med. Phys. Fitness.* (2022)
 - 4) Seeley A.D., Sherman R.A. An Ice Vest, but Not Single-Hand Cooling, Is Effective at Reducing Thermo-Physiological Strain During Exercise Recovery in the Heat. *Front Sports Act Living.* 3:660910(2021)
 - 5) Douma M.J., Aves T., Allan K.S., Bendall J.C., Berry D.C., Chang W.T., et al. First aid cooling techniques for heat stroke and exertional hyperthermia: A systematic review and meta-analysis. *Resuscitation.* 148:173-90(2020)
 - 6) Nakamura D., Muraishi K., Hasegawa H., Yasumatsu M., Takahashi H. Effect of a cooling strategy combining forearm water immersion and a low dose of ice slurry ingestion on physiological response and subsequent exercise performance in the heat. *J. Therm. Biol.* 89:102530(2020)
 - 7) Barwood M.J., Davey S., House J.R., Tipton M.J. Post-exercise cooling techniques in hot, humid conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 107 (4) :385-96 (2009)
 - 8) Hashimoto K., Horie S., Nagano C., Hibino H., Mori K., Fukuzawa K., et al. A fan-attached jacket worn in an environment exceeding body temperature suppresses an increase in core temperature. *Sci. Rep.* 11 (1) :21269(2021)
 - 9) Otani H., Fukuda M., Tagawa T. Cooling Between Exercise Bouts and Post-exercise With the Fan Cooling Jacket on Thermal Strain in Hot-Humid Environments. *Front Physiol.* 12:640400(2021)
 - 10) Otani H., Goto T., Goto H., Shirato M. Time-of-day effects of exposure to solar radiation on thermoregulation during outdoor exercise in the heat. *Chronobiol. Int.* 34 (9) :1224-38(2017)
 - 11) Zuo J.M, E. A. Heat Transfer Characteristics of Sports Apparel. *Journal of ASTM International.* 1 (10) :10(2004)
 - 12) Underwood C.R., Ward E.J. The solar radiation area of man. *Ergonomics.* 9 (2) :155-68(1966)
 - 13) ISO. Ergonomics of the physical environment — Subjective judgement scales for assessing physical environments. ISO 10551. 28(2019)
 - 14) Borg G.A. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 14 (5) :377-81 (1982)
 - 15) Nielsen B., Kassow K., Aschengreen F.E. Heat balance during exercise in the sun. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 58 (1-2) :189-96(1988)
 - 16) Parsons K. Human thermal environments. *Taylor & Francis.* (2014)
 - 17) DuBois DDEF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Archives of Internal Medicine.* 17:9(1916)
 - 18) ISO. Ergonomics of the thermal environment— Instruments for measuring physical quantities ISO 7226. (1998)
 - 19) Ramanathan N.L. A New Weighting System for Mean Surface Temperature of the Human Body. *J. Appl. Physiol.* 19:531-3(1964)
 - 20) Otani H., Kaya M., Tamaki A., Goto H., Tokizawa K., Maughan R.J. Combined effects of solar radiation and airflow on endurance exercise capacity in the heat. *Physiol. Behav.* 229:113264(2021)
 - 21) Hosokawa Y., Belval L.N, Adams WM, Vandermark LW, Casa DJ. Chemically Activated Cooling Vest's Effect on Cooling Rate Following Exercise-Induced Hyperthermia: A Randomized Counter-Balanced Crossover Study. *Medicina (Kaunas).* 56 (10) (2020)
 - 22) Huggins R., Glaviano N., Negishi N., Casa D.J., Hertel J. Comparison of rectal and aural core body temperature thermometry in hyperthermic, exercising individuals: a meta-analysis. *J.. Athl. Train.* 47 (3) :329-38(2012)
 - 23) Lynch G.P., Periard J.D., Pluim B.M., Brotherhood J.R., Jay O. Optimal cooling strategies for players in Australian Tennis Open conditions. *J. Sci. Med. Sport.* 21 (3) :232-7(2018)
 - 24) 鈴木英悟, 櫻村修生, 高橋弘彦, 南和広, 中井誠一. 衣服内空気循環が夏季暑熱環境下農作業時の体温調節反応に及ぼす影響. *日生気誌.* 49 (2) :83-92(2012)