

寒冷下のランニング：パフォーマンスへの影響と寒冷傷害リスク

Running in Cold Weather: Exercise Performance and Cold Injury Risk

John W. Castellani, Ph.D.

Thermal and Mountain Medicine Division, U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine, Natick, Massachusetts

要約

ランナーは、多様な寒冷環境でトレーニングを行ない、レースに出場する。しかしこれによって、パフォーマンスに影響が生じたり、寒冷傷害が発生したりする可能性がある。本稿では、寒冷環境がランニングパフォーマンスに及ぼす影響を概観する。また、ランナーに発生しがちな寒冷傷害を説明するとともに、傷害を回避するリスク管理方法を示す。

序論

寒さという要因のみで、寒冷環境におけるランニングを止めるべきではない。寒さに耐えて屋外活動を行なっても、大抵の場合は害がない。事実、マラソンやウルトラマラソンは、寒い時期に、シアトル、オーストリア、スイス、アラスカ、北極圏など、様々な場所で実施される。しかし、寒冷環境で運動を行なう際は、特に気候条件の変化に対する備えがないと、寒冷傷害(凍傷や低体温症)のリスクが高まる(10)。一般的には、防寒服を着用したり屋内に避難したりして寒さを回避し、寒冷傷害のリスクを下げる(7)。しかし、アスリートが競技で成功を取るには、さらに厳しい寒さ(<-18℃)に耐える必要がある。例えば、気温-35℃でマラソンを完走したランナーについて、2件の凍傷が報告されている(3)。本稿では、寒冷環境が運動パフォーマンスに及ぼす影響とランニング中の寒冷傷害リスクについて概説する。

寒冷曝露の生物物理学

蓄熱量が増えても減っても深部体温は変化する。放散する以上の熱が産生されれば、身体組織の蓄熱量が増加して深部体温が上昇する。逆に、生み出

される熱量が外部環境に失われるよりも少なければ、蓄熱量が減少して深部体温が低下する(16)。熱の産生と損失の関係は以下の数式によって表すことができる(16)。

$$S=M-E-R-C-K$$

ここで、Sは蓄熱量を示し、Mは代謝による熱産生量、Eは蒸発による熱交換量、Rは放射による熱交換量、Cは対流による熱交換量、Kは伝導による熱交換量を示す。この式は、熱交換経路(E、R、C、K)による熱損失のみを含むように単純化されている。実際には、これらの熱交換経路を介して熱取得が行なわれることもある(18)。さらに、関係を単純化するために、力学的仕事への熱変換量も式に含めていない。単位はすべてW/m²である。環境温度が皮膚温度よりも低く、水蒸気圧が皮膚表面の汗の蒸気圧よりも低ければ、この式は熱損失量を示すことになる。

雨や汗が染み込んで濡れたウェアは、乾燥したウェア以上に、寒気の中で運動するアスリートの深部体温を低下させる。この差の原因は、空気と水の物理的性質にある。つまり、水の熱伝導率が空気の熱伝導率の25倍に上る

ことにある(32)。濡れたウェアは、深部組織から伝導と対流(血液循環)によって皮膚に運搬された熱をたちまち放散する。

寒冷環境下の運動においても、熱取得と深部体温の上昇は起こりうる。なぜなら、「寒さの中にいるからといって寒いとは限らない」(1)からである。この状態は、一次的には着衣による断熱によってもたらされる。着衣はマイクロ環境を作り出し、皮膚を温めて汗の蒸散による放熱を促す(5)。代謝によって生み出される熱量と釣り合うだけの損失がなければ、体温は上昇する可能性がある。発汗と運動効率には個人差

があるため、「標準服」を定めることは不可能である。汗をかきすぎる人もいれば(着衣の断熱性の劣化をもたらす)、断熱による十分な保護が得られない人もいる(7)。ランナーは、様々な環境条件で様々なウェアの組み合わせを試して、それぞれにおける代謝率との適切なバランスを見出す必要がある。

実験室の寒冷環境における有酸素性運動のパフォーマンス

寒冷環境における運動パフォーマンスに関する研究は数少ない。屋外で実施される実験のほとんどは、TTE(疲労時間)テストを利用して、寒冷環境を

より高い気温あるいは一般に温暖環境と定義される環境(約20℃)と比較している。表1に、寒冷環境での有酸素性パフォーマンスを検証した研究を挙げた。総合的にみると、寒冷環境が温暖環境以上に有酸素性パフォーマンスに影響するかどうかについてはいかなる合意も存在しない。寒冷な気温が疲労までの時間を減少させることを示す研究(17,24,30,31)が存在する一方で、延長させる(4,23)、あるいは何の変化ももたらさない(8,28)ことを示す研究も存在する。複数の気温を体系的に利用した2つの実験室研究では、逆U字型のパターンが観察された。すなわち、疲労

表1 寒冷環境が有酸素性運動のパフォーマンスに及ぼす影響を扱った研究(5)

研究	被験者数	運動様式	強度	環境	研究結果
Patton & Vogel (24)	男性8名	サイクルエルゴメータ(ペダル回転数60rpm)	75~80% $\dot{V}O_2max$ 運動前に各温度に30時間曝露	20℃と-20℃ 相対湿度20~40% 風速0.5m/秒	-20℃では、疲労までの時間が20℃の38%減少した。
Galloway & Maughan (17)	男性8名	サイクルエルゴメータ(ペダル回転数60~70rpm)	70% $\dot{V}O_2max$ で疲労まで	4℃、11℃、21℃、31℃ 相対湿度70% 風速0.7m/秒	21℃よりも、4℃と11℃で $\dot{V}O_2$ が大きかった。疲労までの時間は11℃で最も長く(93.5±6.2分)、4℃では15%減少した。
Sandsundら (31)	男性8名	トレッドミル(傾斜6%)	55% $\dot{V}O_2max$ で10分 60~95% $\dot{V}O_2max$ で4×5分 95% $\dot{V}O_2max$ で10分(サルブタモール投与) 85% $\dot{V}O_2max$ で5分(サルブタモール投与)	-15℃と23℃ -15℃ではサルブタモールの投与の有無 相対湿度52% 風速1.5m/秒	疲労までの時間は23℃よりも-15℃のほうが短く、 $\dot{V}O_2$ は-15℃のほうが大きかった。サルブタモール投与群では、運動後のFEV1が増加した。
Parkinら (23)	男性8名	サイクルエルゴメータ(ペダル回転数80rpm)	70% $\dot{V}O_2max$ で疲労まで	3℃、20℃、40℃ 相対湿度<50%	疲労までの時間は3℃で最も長かった。
Carlingら (4)	男性9名	プロのサッカーの試合	ランニング速度 0.0~14.3km/時 14.4~19.7km/時 ≥19.8km/時	≤5℃、6~10℃、11~20℃、≥21℃	≥21℃で走行距離が最も短かった(118.7±6.9m)。1分当たりの走行距離は≤5℃で長かった(9.1±3.8m)。
Sandsundら (30)	男性9名	トレッドミル(傾斜6%)	60% $\dot{V}O_2max$ で10分、その後 67~91% $\dot{V}O_2max$ で4×5分、 続いて $\dot{V}O_2max$ でTTEテスト	-14℃、-9℃、-4℃、 1℃、10℃、20℃風速 5m/秒	疲労までの時間は-14℃と-9℃で最も長かった。 $\dot{V}O_2max$ は有意差なし。
Renbergら (28)	女性9名	トレッドミル(傾斜6%)	71% $\dot{V}O_2max$ で10分、その後 76~89% $\dot{V}O_2max$ で4×5分、 続いて $\dot{V}O_2max$ でTTEテスト	-14℃、-9℃、-4℃、 1℃、10℃、20℃ 風速5m/秒	気温間で疲労までの時間に有意差なし。

FEV1=1秒量(努力性肺活量において最初の1秒間で吐き出した量)、TTEテスト=疲労時間テスト、 $\dot{V}O_2max$ =最大酸素摂取量

までの時間はある大気温(短パンまたはTシャツ着用時は11℃、クロスカン トリー用ウェア着用時は-4℃と1℃) で最大となり、この至適大気温を上回 るあるいは下回ると疲労までの時間が 減少した。しかし、この結果はCarling らのフィールド研究(4)の結果とは対 照的である。Carlingら(4)によると、 間欠的運動を主体とするサッカー選 手のランニング距離は、気温が $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 、 6~10℃、11~20℃のどの範囲でも同 じであった。さらに、Parkinら(23)に よると、サイクルエルゴメータ(70% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$)を利用して、寒冷環境におけ る疲労までの時間(85±8分)を計測す ると、温暖環境(60±11分)よりも42% 長かった。この結果は、2つの気温(4 ℃と21℃)の間にはいかなる差異も見 出さなかったGalloway&Maughan(17) とは対照的である。またCheuvrontら (8)も、30分のタイムトライアルにお いて2℃と20℃の間にはいかなる差異 も見出さなかった。上記の諸研究は男性 を被験者としているが、これに対して Renbergら(28)は、女性を被験者にし て複数の気温条件(-14~20℃)で実 験を繰り返した。それによると、女性 の場合は気温が低下しても疲労までの 時間が減少せず、男性を被験者とした 実験とは対照的な結果が得られた。こ のような男女の差は、男性は皮膚温度 が高く、直腸温度が低いために、熱損失 が多かったことによると考えられてい る。寒冷環境が持久系の有酸素性運動 のパフォーマンスに影響を及ぼすかど うかを明らかにするには、より系統的 なデータが必要である。以上の様々な 研究結果から得られる興味深い知見 は、至適有酸素性パフォーマンスが得 られるのは、典型的な実験室環境(20 ~23℃)ではなく、はるかに寒冷な環 境であるとみられることである。

研究では、 $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ も有酸素性パフ ェーマンスの代理指標として利用され ている。それによると、-20℃(21,27)

と0℃(27)では、20℃と比べて $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ が5%低下することが見出された。し かし、5℃と18℃の比較を行なった別 の研究(19)では、 $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ にいかなる 差も見出されなかった。有酸素性パフ ェーマンスの指標として $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ を利 用したこれらの研究の結果は、疲労ま での時間を利用した諸研究の結果と類 似している。

マラソンにおける 運動パフォーマンス

身体パフォーマンスは、エネルギー 出力、神経筋系の機能、心理学的因子の 関数である(2)。寒冷環境での運動は それらに影響を与えて、心臓血管系の 機能と燃料運搬を変化させ、神経伝導 と骨格筋の収縮を変化させ、運動強度

の認識を介して、パフォーマンスを低 下させる可能性がある(5)。多くの研 究は実験室で行なわれ、サイクルエル ゴメータやランニングを利用して疲労 までの時間を調査したものである。し かし、特にマラソンにおけるランニ ングパフォーマンスに対して大気温が及 ぼす影響を検証した研究も存在する。

実験室研究の結果と同じく、マラソ ンのランニングパフォーマンスには約 8~12℃の大気温が最適であることが 見出されている。Elyら(15)によると、 マラソンの最速記録1~10位、世界記 録、コース記録では、記録時の大気温 が、男子ではそれぞれ11.0℃、10.6℃、 12.8℃、女子では12.6℃、11.6℃、13.6 ℃であった(図1)。同様にVihma(34) は、気温10~12℃がマラソンにとっ

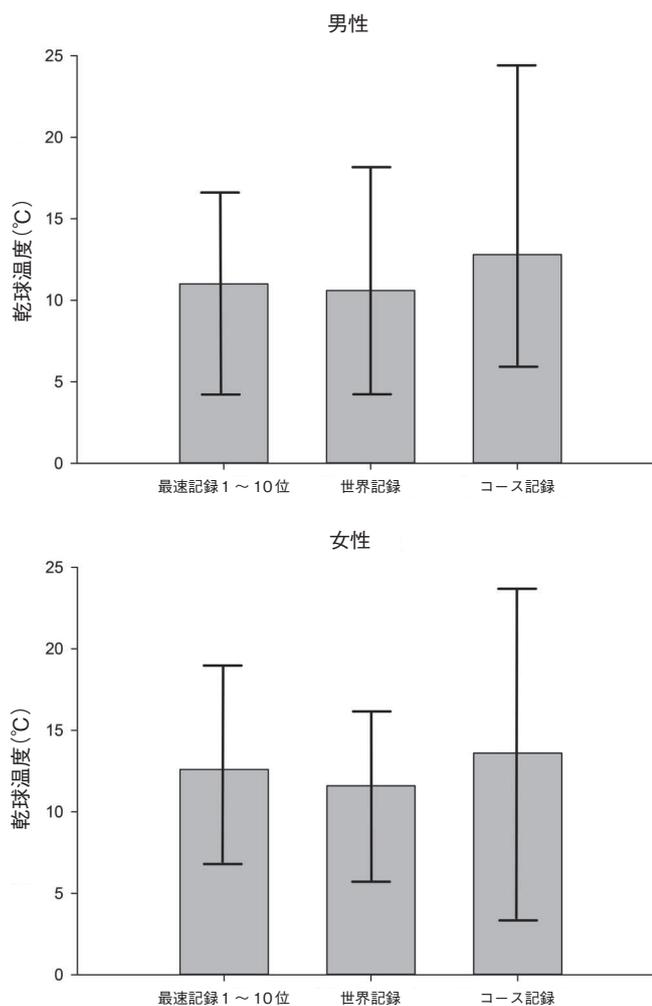


図1 マラソンの最速記録1~10位(男女で10名)、世界記録(男性9名、女性8名)、コース 記録(男性24名、女性34名)の際の乾球温度：図には平均値と範囲を示す。Elyら(15)より。

て最適であることを示した。しかし、Trapasso&Cooper(33)によると、ボストンマラソンで最高パフォーマンスが示されたのは、暑さ指数(WBGT: Wet Bulb Globe Temperature)7.8℃未満であり、これは大気温にすると2.8～21.4℃にあたる。Elyら(14)はWBGT5℃(大気温8.6～21.9℃)をベンチマークとして、フルマラソンのランニングタイムに温度の上昇(8.6℃から21.9℃)が及ぼす影響を検証した。その結果、やはりマラソンのパフォーマンスには大気温の低いほうが適していることが示された。El Helouら(13)は、ランニングスピードの点からみると、男性でも女性でも約10℃が最適であることを示した。興味深いことに、この研究において分析されたあるマラソン(2009年のシカゴマラソン)のデータでは大気温が1.7℃であったが、女性データを統計的に当てはめると、1.7℃でのランニングスピードは10℃の場合よりも遅くなると考えられた。しかしデータのばらつきが大きく、0℃近い大気温では、10℃と比べてパフォーマンスが低下するかどうかについて確固とした結論を下すことはできない。さらに多くのデータが必要である。

寒冷傷害

寒冷傷害は、低体温症、凍傷(凍結性寒冷傷害)、凍瘡(非凍結性寒冷傷害)の3つに分類される(11)。低体温症は深部体温が35℃以下(95°F)の状態を指す。凍傷と凍瘡は、四肢や皮膚の露出部分に発生する。凍傷は凍結性の寒冷傷害であり、細胞や組織を凍結させる。これに対して組織の凍結をもたらさない非凍結性寒冷傷害には、凍瘡や浸水足/塹壕足炎が含まれる。低体温症と局所的な寒冷傷害が同時に発生することは珍しくない。

低体温症

全身の体温が低下する低体温症は、

臨床的には深部体温35℃以下の状態と定義される。初期症状として、戦慄、感情鈍麻、無関心がみられる。深部体温が35℃よりも下がり続けると、錯乱、昏睡、不明瞭発語(ぶつぶつ言う、つぶやく、口ごもる、どもるなど)などの症状が現れる(11)。**表2**に、深部体温とその低下に伴う典型的な生理学的変化を挙げる(7)。

レースにおいて低体温症が特に懸念されるのは湿度が高い場合である。例えば2018年のボストンマラソンは、気温5.8℃で1日中雨風が強かったため、「run to cover(遮蔽物を探して走る)」マラソンと呼ばれた。またPorter(25)は、1982年のイギリスのファナム(大気温12℃、強い雨風)と、1984年のギルフォード(大気温8℃、最大風速48km/時、豪雨)のレースで低体温症患者が発生したことについて述べている。さらにRoberts(29)は、ツインシティーズマラソン(ミネソタ州ミネ

アポリス)では12年の間に46件の低体温症が発生したことを報告している。その報告によると、ゴールしなかったランナーが最多(参加者の31%)であったのは1986年であり、弱い風を伴う低温(-7℃)と氷雨のせいであったと考えられる。長距離レースで生じる可能性のあるもうひとつの問題は、疲労に伴う代謝率と熱産生の低下である。身体疲労は低体温症のリスクを高める可能性があるとして最初に主張したのはPugh(26)である。Pughは、多くの低体温症患者(死者25名)をもたらした23のイベントに関する報告を分析した。イベントのひとつフォー・インズ・ウォーク(Four Inns Walking Competition)は、マラソンではなくハイキングレースである。小雨と弱風の中、240名の男性が午前6時に出発してトップでのゴールインを目指したが(26)、イングランドのダービーシャーの荒野を約72.5kmにわたって山歩き

表2 深部体温と、深部体温の低下に伴って発生する生理学的変化

ステージ	深部体温		生理学的変化
	華氏	摂氏	
正常体温	98.6	37.0	
軽度低体温	95.0	35.0	戦慄、血圧上昇
	93.2	34.0	健忘、構音障害、判断力低下、行動変化
	91.4	33.0	運動失調、感情鈍麻
中等度低体温	89.6	32.0	混迷
	87.8	31.0	戦慄消失、瞳孔散大
	85.2	30.0	不整脈、心拍出量の減少
	85.2	29.0	意識消失
	82.4	28.0	心室細動、換気低下
	80.6	27.0	反射自発運動の消失
高度低体温	78.8	26.0	酸塩基平衡異常、疼痛反応消失
	77.0	25.0	脳血流量の低下
	75.2	24.0	低血圧、徐脈、肺水腫
	73.4	23.0	角膜反射消失、反射消失
	66.2	19.0	脳電図平坦化
	64.4	18.0	心停止
	59.2	15.2	幼児救命例最低体温
56.7	13.7	成人救命例最低体温	

Castellaniら(7)より

するレースであった(通常のゴールタイムは9.5~22時間)。イベント中、天候が徐々に悪化し、雨風(約46km/時)が強まった。この年の完走者は全参加者の9.2%にあたるわずか22名であり(例年は66~85%)、低体温症で3名が死亡した。

低体温症の予防

低体温症は、大気温が何度であろうが、代謝率を超える体熱の損失が発生すれば起こりうる。0℃よりかなり高い気温であっても、代謝率が低ければ低体温症になる。また、湿度が高く風の強い環境は、風のない乾燥した環境よりも身体が冷却されやすい。相対的に高い代謝率(>50% $\dot{V}O_2\text{max}$)を維持できれば、低体温症のリスクは下がる。例えばWellerら(35)は、この閾値で運動できれば、比較的風が強い日に湿ったウェアを着用していても、気温4℃でも深部体温を4時間維持できることを示した。しかし、運動強度が低ければ(約35% $\dot{V}O_2\text{max}$)、風が強く湿度の高い寒冷環境では深部体温が低下する(6,26,35)。そのような環境では、レースの前後は雨風を避け、余分に羽織る衣服も準備する必要がある。さらに、寒冷湿潤環境でトレーニングを実施する際は、雨風を避けられる場所を確認し、1人では走らないように注意するべきである。

凍傷

凍傷は、身体組織の温度が0℃以下に下がると発生する。細胞と細胞外液は電解質を含んでいるため、皮膚が凍結する温度は水が凍結する温度よりもやや低く、乾燥した組織は通常-2.2℃前後で凍結する(9)。凍傷は皮膚の露出部分(鼻、耳、頬、手首)に最も多く発生するが、末梢血管が収縮すると組織温が大きく下がるため、衣服の下の手や足にも生じる。凍傷の最も一般的な初期症状は無感覚である。加温中の苦痛

は大きい。したがって加温を行なう際は、ごく軽度の凍傷以外は医療従事者の指示を仰ぐべきである。

凍傷の予防

凍傷リスクを示す最良の指標は、風冷指数(WCTI: Wind Chill Temperature Index)である(図2)。風冷指数は、気温と風速を考慮して体感温度を推定したものである(20,22)。現在、WCTIは露出した顔の皮膚が凍結する時間を予測するために利用されている(12)。この指数は運動の実施を想定していないため、高強度運動中の場合は凍傷リスクを過大評価することになる。ただし、ランナーは自ら風を

作り出しているため、WCTIを推定するにはランニングスピードを考慮する必要がある。大気温が-15℃を超えていれば、凍傷のリスクは5%未満であるが、WCTIが-27℃を下回っている場合は30分以内に凍傷になる可能性があり(7)、安全対策を強める必要がある。

非凍結性寒冷傷害

最も一般的な非凍結性寒冷傷害は、^{ざんこうあし}浸水足/塹壕足炎と凍瘡である。浸水足/塹壕足炎は身体組織が長時間(>12時間)にわたって0~15℃に曝されることによって発生するが、凍瘡は体表の損傷であり、むき出しの皮膚がほ

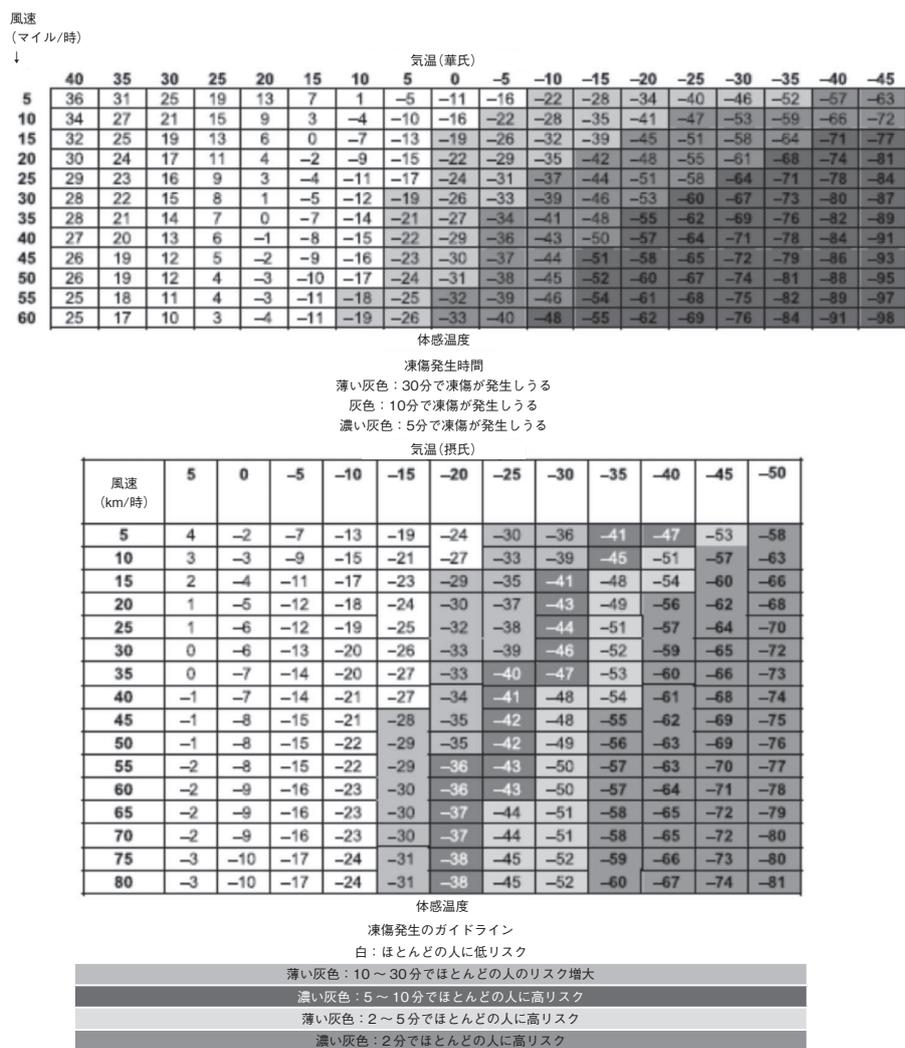


図2 風冷指数(上表は華氏、下表は摂氏): 凍傷発生時間は、露出した顔の皮膚について示す。上表はアメリカ国立気象局、下表はカナダ気象学会/カナダ環境省より。

んの数時間曝されただけでも発生する(11)。これらの傷害は、実際に水にかかることや降雨、あるいは汗で湿った靴下によって靴の中に湿った環境が生み出されることで発生する。非凍結性寒冷傷害の分類は、曝露後数日または数週間で発生する症状や回復段階に基づく。非凍結性寒冷傷害は、数時間あるいは数日間継続するウルトラマラソンで発生しやすいと考えられる。

寒冷傷害のリスク管理と現場への応用

寒冷ストレスをうまく管理するには、アスリート、コーチ、レースの運営組織が寒冷環境でのランニングに伴う健康被害の性質を理解し、適切な対策によって低体温症と凍傷のリスクを最小化する必要がある。適切な対策と監視を行えば、大抵の寒冷環境ではトレーニングやレースを安全に実施することができる。したがって、一般にレースを中止する必要はない。極寒の日にトレーニングを行なうランナーのためのリスク緩和方策としては、自宅近くで走ること、携帯電話を所持すること、複数名で走ることなどが挙げられる。また、負傷しないように、氷上や雪中の足取りに注意することも必要である。寒冷環境でのランニング経験の少ないランナーは、防寒具の重ね着を試して、それぞれの場合の発汗量を知る必要がある。さらに、天候の変化(降雨など)に注意を払い、雨風を避けられる場所が近くにはない場合は余分のウェアを持参するかどうかを決める必要もある。寒冷傷害を防ぐには、正式なリスク管理手順として、潜在的な危険と寄与因子を特定し、トレーニングやレースの前/中/後でとるべき効果的な制御方法や対処方法を見出すことが挙げられている。詳細はアメリカスポーツ医学会の公式見解を参照のこと(7)。

まとめ

寒冷環境でもランニングを安全に行なうことは可能である。マラソンのような長距離走では、寒冷環境(8~12℃)でベストタイムが生まれることが示されている。同様の結果は実験室研究によっても示されている。しかし、トレーニングやレースでは寒冷傷害が懸念される。アメリカスポーツ医学会のガイドライン(7)などに従って、正式なリスク管理手順をとることにより、リスクを適切に緩和することが可能である。◆

注

本稿で示した見解は著者らの個人的見解であり、アメリカ陸軍や国防総省の公式見解、またはその反映ではない。本稿における営利団体や商品への言及は、陸軍による製品やサービス利用の推奨を示すものではない。

References

1. Bass DE. Metabolic and energy balances of men in a cold environment. In: *Cold Injury*. Horvath SM, ed. Montpelier, VT: Capital City Press, 1958. pp. 317-338.
2. Bergh U. Human power at subnormal body temperatures. *Acta Physiol Scand* 478: 1-39, 1980.
3. Boyce S, Murray A, Scott D. Genghis Khan Ice Marathon: Preparation, strategy and the effect of exercise in an extreme cold environment in a group of experienced ultrarunners (abstract). *Br J Sports Med* 51: 302, 2017.
4. Carling C, Dupont G, Le Gall F. The effect of a cold environment on physical activity profiles in elite soccer match-play. *Int J Sports Med* 32: 542-545, 2011.
5. Castellani JW, Tipton MJ. Cold stress effects on exposure tolerance and exercise performance. *Compr Physiol* 6: 443-469, 2016.
6. Castellani JW, Young AJ, DeGroot DW, et al. Thermoregulation during cold exposure after several days of exhaustive exercise. *J Appl Physiol* 90: 939-946, 2001.
7. Castellani JW, Young AJ, Ducharme MB, et al. Prevention of cold injuries during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 38: 2012-2029, 2006.
8. Chevront SN, Carter R, Castellani JW, Sawka MN. Hypohydration impairs endurance exercise performance in temperate but not cold air. *J Appl Physiol* 99: 1972-1976, 2005.
9. Danielsson U. Windchill and the risk of tissue freezing. *J Appl Physiol* 81: 2666-2673, 1996.
10. DeGroot DW, Castellani JW, Williams JO, Amoroso PJ. Epidemiology of U.S. Army cold weather injuries, 1980-1999. *Aviat Space Environ Med* 74: 564-570, 2003.
11. Department of the Army. *TB MED 508: Prevention and Management of Cold Weather Injuries*. Washington, DC, 2006.
12. Ducharme MB, Brajkovic D. Guidelines on the risk and time to frostbite during exposure to cold wind. In: *Proceedings of the RTO NATO Factors and Medicine Panel Specialist Meeting on Prevention of Cold Injuries*. Amsterdam, the Netherlands: NATO. pp. 2-1-2-9, 2005.
13. El Helou N, Tafflet M, Berthelot G, et al. Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS one* 7: e37407, 2012.
14. Ely MR, Chevront SN, Roberts WO, Montain SJ. Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc* 39: 487-493, 2007.
15. Ely MR, Chevront SN, Montain SJ. Neither cloud cover nor low solar loads are associated with fast marathon performance. *Med Sci Sports Exerc* 39: 2029-2035, 2007.
16. Gagge AP, Gonzalez RR. Mechanisms of heat exchange: Biophysics and physiology. In: *Handbook of Physiology: Environmental Physiology*. Fregly MJ, Blatteis CM, eds. Bethesda, MD: American Physiological Society, 1996. pp. 45-84.
17. Galloway SDR, Maughan RJ. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1240-1249, 1997.
18. Gonzalez RR, Sawka MN. Biophysics of heat transfer and clothing considerations. In: *Human Performance Physiology and Environmental Medicine at Terrestrial Extremes*. Pandolf KB, Sawka MN, Gonzalez RR, eds. Indianapolis, IN: Benchmark, 1988. pp. 45-95.
19. Matsui H, Shimaoka K, Miyamura M, Kobayashi K. Seasonal variation of aerobic work capacity in ambient and constant temperature. In: *Environmental Stress: Individual Human Adaptations*. Folinsbee L, Wagner JA, Borgia JF, Drinkwater BL, Gliner JA, Bedi JF, eds. New York, NY: Academic Press, 1978. pp. 279-291.
20. National Weather Service. *Windchill*

Temperature Index. Washington, DC: Office of Climate, Water, and Weather Services, National Atmospheric and Atmospheric Administration, 2001.

21. Oksa J, Kaikkonen H, Sorvisto P, et al. Changes in maximal cardiorespiratory capacity and submaximal strain while exercising in cold. *J Therm Biol* 29: 815–818, 2004.
22. Oszcewski RJ, Bluestein M. The new wind chill equivalent temperature chart. *Bull Amer Meteorol Soc* 86: 1453–1458, 2005.
23. Parkin JM, Carey MF, Zhao S, Febbraio MA. Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise. *J Appl Physiol* 86: 902–908, 1999.
24. Patton JF, Vogel JA. Effects of acute cold exposure on submaximal endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 16: 494–497, 1984.
25. Porter AM. Marathon running and adverse weather conditions: A miscellany. *Br J Sports Med* 18: 261–264, 1984.
26. Pugh LGCE. Cold stress and muscular exercise, with special reference to accidental hypothermia. *Br Med J* 2: 333–337, 1967.
27. Quirion A, Laurencelle L, Paulin L, et al. Metabolic and hormonal responses during exercise at 20, 0, and -20 degrees C. *Int J Biometeorol* 33: 227–232, 1989.
28. Renberg J, Sandsund M, Wiggen ON, Reinertsen RE. Effect of ambient temperature on female endurance performance. *J Therm Biol* 45: 9–14, 2014.
29. Roberts WO. A 12-yr profile of medical injury and illness for the Twin Cities Marathon. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1549–1555, 2000.
30. Sandsund M, Saurasunet V, Wiggen O, et al. Effect of ambient temperature on endurance performance while wearing cross-country skiing clothing. *Eur J Appl Physiol* 112: 3939–3947, 2012.
31. Sandsund M, Sue-Chu M, Helgerud J, Reinertsen RE, Bjermer L. Effect of cold exposure (-15 ° C) and salbutamol treatment on physical performance in elite nonasthmatic cross-country skiers. *Eur J Appl Physiol* 77: 297–304, 1998.
32. Toner MM, McArdle WD. Human thermoregulatory responses to acute cold stress with special reference to water immersion. In: *Handbook of Physiology: Environmental Physiology*. Fregley MJ, Blatteis CM, eds. Bethesda, MD: American Physiological Society, 1996. pp. 379–418.
33. Trapasso LM, Cooper JD. Record

performances at the Boston marathon: Biometeorological factors. *Int J Biometeorol* 36: 63–68, 1989.

34. Vihma T. Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol* 54: 297–306, 2010.
35. Weller AS, Millard CE, Stroud MA, Greenhaff PL, Macdonald IA. Physiological responses to cold stress during prolonged intermittent low- and high-intensity walking. *Am J Physiol* 272: R2025–R2033, 1997.

From *Strength and Conditioning Journal*
Volume 42, Number 1, pages 83-89.

著者紹介



Dr. Castellani :
米陸軍環境医学研究所の高温・高所医学部の研究生理学
者。