

Key Words【暑熱順化：heat acclimation、熱ストレス：heat stress、皮膚温度：skin temperature、深部体温：core temperature】

暑熱下のランニング：パフォーマンスへの影響と暑熱下のレースのための準備方策

Running in the Heat :

Performance Consequences and Strategies to Prepare for Hot-Weather Racing

Brett R. Ely, ¹ Ph.D. Matthew R. Ely, ² M.S.

¹Department of Sport and Movement Science, Salem State University, Salem, Massachusetts

²Department of Human Physiology, University of Oregon, Eugene, Oregon

要約

ランナーは、競技会への準備としてできるだけ多くのパフォーマンス変数を調整しようとする。ただし、パフォーマンスに多大な影響を及ぼすレース当日の天候はコントロールのしようがない。本稿では、ランニングパフォーマンスの点から暑熱を定義し、暑熱に関連してパフォーマンス減衰が発生する生理学的仕組みを解説する。さらに、暑熱による心臓血管系の負担への影響を緩和して、ランニングパフォーマンスの低下を抑制する方策について論じる。

暑熱下でのランニングとは何か

従来の実験室研究は、湿度を変えて35～45℃の環境温度にアスリートを曝し、熱ストレスが生理学的応答と運動パフォーマンスに及ぼす影響を検証してきた。その際の研究室の環境条件は、WBGT(湿球黒球温度：気温、湿度、日射量、風速を考慮した暑さ指数)がしばしば32.2℃以上に達する。しかし、イベントアラートシステム(アメリカロードランナーズクラブ)では、「暑熱」

(WBGT>32.2℃)環境でのロードレースは中止を勧告される。また、ツインシティーズマラソンで発生した医療事象に関する近年の分析では、開始時の天候が「温暖」(WBGT>22℃)であれば、ランナーの健康を守り、地域医療サービスへの圧迫を避けるために、レースを中止するべきであると主張されている(51)。これは、実際にレースに出場するランナーが、実験室研究と同じ環境で走ることは滅多にないことを意味している。しかし、WBGTがレースの中止勧告基準をかなり下回っていても、ランニングパフォーマンスに深刻な影響が生じうることを示す強いエビデンスが存在する(19,30,62)。

身体と環境に大きな温度勾配が存在することは代謝熱の放散を助ける。体温と環境温度の差が小さくなるほど熱放散能が抑制され、多くの代謝熱が蓄積されて体温が上昇する。運動中に生じる蓄熱量は、人体の熱平衡式を用いて次のように表される。

$$S=M-W\pm R\pm C-E$$

ここでSは蓄熱量(内部体温の熱取得)を示し、Mは代謝による熱産生量、Wは機械の仕事への熱変換量を示す。さらに、R、C、Eは環境を表し、放射によ

る熱交換量R、対流による熱交換量C、蒸発による熱交換量E(皮膚表面における汗の蒸散による)を示す(21)。運動を開始すると、少量の蓄熱をきっかけとして、体表への血流増加(皮膚血管拡張)などの体熱放散メカニズムが活性化され、体温を調節するための発汗が開始される。寒冷環境で中強度運動を実施する場合は、この体熱放散のメカニズムによって深部体温はかなり狭い範囲で維持される。しかし、比較的寒冷な環境であっても、ハーフマラソンやフルマラソンでは、高強度ランニングによる代謝熱産生によって深部体温が2℃以上上昇することも珍しくない(5,9,38,52)。例えば、マラソンの世界記録(エリウド・キプチョゲの2時間1分39秒)のランニングペースが生む代謝熱は約1,560 Wに上る。この代謝熱に対して熱平衡を維持するには、(RとCを介した熱放散を0と仮定すると)レース中に5 l 近くの汗を蒸散させる必要がある(21)。レース中にこれほど深部体温が上昇して、蒸散が必要であることを考えると、一般的には熱ストレスとみなされないであろう環境温度においてランニングパフォーマンスに負の影響が生じていても不思議ではない。疲

労までの時間を検証した実験室的研究(22)によると、従来の熱ストレス研究で利用されてきた環境温度を大きく下回る20℃でも持久力の低下が発生した。確かに、実験室でステーションaryバイクやトレッドミルを利用すると、地上でのランニングと比べて対流による冷却率が低いいため、実験室研究と現実世界のランニングパフォーマンスは必ずしも一致しない。とはいえ、以下のパフォーマンス分析に従うと、やはり比較的寒冷な環境が長距離走のパフォーマンスには最適であると考えられる。

マラソンも含めて、レースで好記録が出る大会に共通する天候変数は、外気温約12℃(WBGT8℃)という比較的寒冷な環境である(18,30,41,62)。約12℃をわずかでも超えると、競技レベルを問わずランニングスピードが徐々に低下するが、タイムの遅いランナーほど低下が大きい(19,30,62)。また、パフォーマンス変数に影響を及ぼすだけでなく、環境条件のわずかな上昇(WBGT>13℃)に伴って、熱中症などの外来診察の回数が増えることも示されている(30,51,62)。これらのデータから、ランニングによる高い代謝率と温暖な環境温度(12~22℃)の相乗効果は、ランナーの生理機能とランニングパフォーマンスに深甚な影響を及ぼすと考えられる(図1)。

暑熱下でパフォーマンス減衰が生じる生理学的仕組み

ランニングパフォーマンスの低下と早すぎる疲労を招く、生理学的および心理学的因子は数多く考えられる。しかし、熱ストレスによるパフォーマンス制限の生理学的仕組みについては、脳温度の上昇が及ぼす影響(7)や、運動する骨格筋へ血液を灌流させつつ、身体冷却に適した皮膚血流量を維持することによる心臓血管系への多大な要求(15)がこれまで主な調査対象とされて

きた。現在、運動生理学の分野では、温暖~暑熱環境でパフォーマンスの低下が生じる主な理由をめぐる議論がある。高体温が誘発する疲労の原因としては、心臓血管系の変化、末梢系(筋系)因子、中枢系因子の複雑な相互作用が関与するとみられる(32)。寄与因子としては、深部体温の上昇(28)、皮膚温度の上昇と皮膚血流量の増加(26)、深部体温と皮膚温度の収束(47)、発汗に伴う水分喪失による漸進的脱水(54)、致命的な血圧や深部体温を避けるために熱産生を減少させようとする(予測的制御)脳への様々な情報のインプット(37,61)などがある。

深部体温の上昇

複数の研究(28,42)によって、深部体温40℃を臨界点として熱ストレスによる疲労が確実に発生することが示されており、暑熱下では、深部体温の上昇の結果として、持久力や作業能力が低

下することが確立されている。深部体温40℃は熱射病と関連するだけでなく(2)、脳波や運動神経系のアウトプットの変化とも関連する(43,46)。これは、約40℃の深部体温が、致命的な高体温を回避する安全ブレーキとして機能する、あるいは少なくともパフォーマンス急低下の徴候(44,46)かもしれないという解釈を成り立たせる。脳温度が上昇するにつれて(≥40℃)運動パフォーマンスは低下する。しかし、深部体温40℃で急激なパフォーマンス低下の危機に陥るという考えを否定する複数の報告がある。すなわち、直腸温度>40℃でも高水準のパフォーマンスを維持するケースが報告されている。ある研究(17)は深部体温の臨界点を検証するために、寒冷環境(WBGT約13℃)と暑熱環境(WBGT約27℃)において、鍛錬されたランナーに8kmのタイムトライアルを行なわせ、直腸温度、皮膚温度、心拍数を観察した。8km完走後、

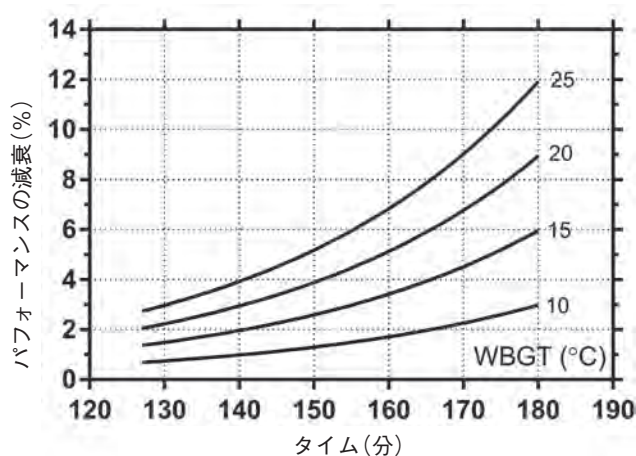


図1 WBGTの上昇に伴うタイム別(2時間10分~3時間)のパフォーマンスの減衰: WBGT5~10℃は、一般にあらゆる能力のランナーがベストパフォーマンスを発揮できる環境条件である。WBGTが上昇するにつれて、ランニングスピードは定量的に低下するが、遅いランナーほど影響が大きい。例えば、2020年のアメリカマラソントライアルにおける男女の出場資格基準はそれぞれ2時間19分と2時間45分であった。理想に近い天候環境(WBGT約5℃)においてこのタイムで走る体力のあるランナーは、WBGTが5℃上昇するごとにパフォーマンスが1~2%低下すると考えられる。例えばWBGT15℃では、男性の基準タイムは2%低下して2時間19分から2時間21分46秒となり、女性の基準タイムは4%低下して2時間45分から2時間51分36秒になる。環境温度が上昇するにつれて男女どちらも同じように速度が低下する。速度の低下は性別固有の現象ではない。したがって、女性が2時間19分の場合にも男性が2時間45分の場合にも、同様に該当すると考えられる。許可を得てElyら(19)より再掲。

深部体温は暑熱環境のほうがわずかに高く(0.5℃)、皮膚温度は暑熱環境のほうが大幅に高かった(4℃)。総合的なパフォーマンスは、寒冷環境と比べて暑熱環境で大きく低下した(寒冷環境では個人のベストパフォーマンスが平均1.5%低下したが、暑熱環境では7.9%低下した)。しかし、暑熱環境でも寒冷環境でも、深部体温が40℃以下の場合と以上の場合とでは平均ランニング速度は変わらなかった。さらに、内部体温の閾値を超えることを回避するために、ランナーが深部体温の上昇率に基づいて予測的にランニングペースを調整することを示すエビデンスは得られなかった。

そこで、暑熱下において、パフォーマンスに深部体温と皮膚温度が及ぼす影響をそれぞれ捉えるために、短時間の運動課題(15分間のタイムトライアル、3,000～4,000mのレースと同等)を暑熱環境(40℃で相対湿度20%)と温暖環境(20℃で相対湿度50%)で実施した。その結果、深部体温はどちらの環境でもほぼ等しく38.5℃を超えることはなかったが、平均皮膚温度は暑熱環境のほうが顕著に高かった(温暖環境では31℃、暑熱環境では36℃)。この研究では水分状態も入念に調整されているが、その結果、暑熱環境では総合的なパフォーマンス(図2)もペース配分も大きく損なわれることが判明した(16)。これらの研究は、実は皮膚温度の上昇がパフォーマンスの低下と強い相関関係にあるにもかかわらず、深部体温が暑熱環境におけるパフォーマンス低下の一次因子として過大評価されている可能性を示唆している。皮膚温度の上昇が影響すると考えると、暑熱下での疲労は、深部体温と皮膚温度が収束して、環境との熱交換を可能にする温度勾配が小さくなるにつれて発生する可能性が高い(8,10,47)。深部体温と皮膚温度からの情報インプットの組み合わせによって、また個人差によ

って、暑熱に伴うパフォーマンスの劣化や疲労困憊が発生する深部体温の幅(38～42℃)が生じる(7)。

皮膚温度と皮膚血流量の増加

寒冷環境での運動においては、自律神経系が皮膚へ向かう血管を収縮させて、運動を行なう骨格筋へ血液を再分配する一方で、中心血流量を適切に維持しようとする(33)。しかし、温暖～暑熱環境下のランニングでは、皮膚血管収縮が弱まり、通常は発汗反応と合わせて交感神経系による血管拡張(能動的血管拡張)が発生する(34)。皮膚における血液循環は比較的伸展性が高いため、血管が拡張すると、中心血流量、1回拍出量、心拍出量が減少する(26)。これは、当のランニングペースにおける心拍数の増加によってある程度補うことができる(1)。しかし、心拍数が増加しても、運動する筋組織の血流量を維持しながら、放熱のために皮

膚に血液を灌流させなければならない場合には、血圧を維持することが難しい。中程度の熱ストレスでは、運動する筋組織と皮膚の両方に血液を運搬しようとして心拍数が増加すると、主観的な運動強度が高まるとともに、パフォーマンスが低下する(63)。さらに厳しい環境における熱ストレスでは、皮膚と運動する骨格筋の間の血流量の奪い合いと心拍出量の再分配に加えて、自律神経系が中心血流量と血圧を維持しようとすることによって、筋への最大酸素運搬量が低下する。これは最終的には、寒冷環境と比べて、暑熱環境における最大酸素摂取量の低下をもたらす(3,63)。

脱水状態

暑熱下でのランニングにおける、運動する骨格筋の血流量の維持と、放熱のための皮膚への灌流という血流量をめぐる争いをさらに悪化させるもの

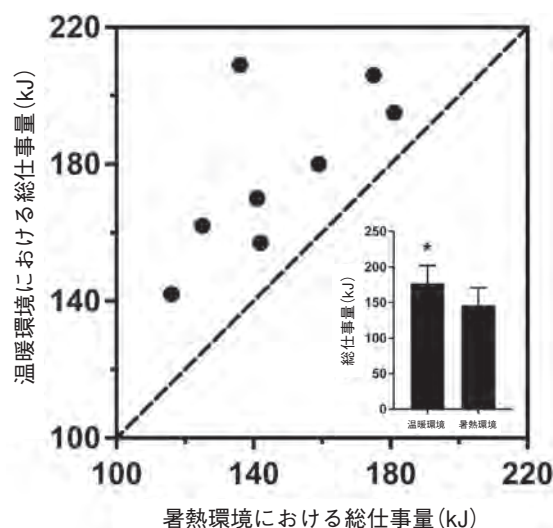


図2 温暖環境(20℃)と暑熱環境(40℃)において15分間のタイムトライアルで行なわれた総仕事量:深部体温はどちらの環境でも大きく変わらず、また、被験者は十分な水分状態にあった。グラフ上の点は各被験者が暑熱環境(x軸)と温暖環境(y軸)で行なった仕事量の関係を示す。グラフ中央の直線は、2つの環境条件において仕事量と同じである場合を示す。被験者全員について暑熱環境での仕事量が少なく(すべての点が中央の直線よりも上にある)、温暖環境に対して平均17%の低下であった(図中のグラフを参照)。*は、暑熱環境と温暖環境に有意差($p < 0.05$)が存在することを示す。これは、深部体温の上昇を伴わずとも、熱ストレスが有酸素性パフォーマンスに大きな影響を及ぼすことを示している。

許可を得てElyら(16)より編集。

が、体温調節のための発汗による水分の喪失である。血流量をめぐる争いに加えて血漿量が徐々に減少することによって、静脈還流、中心血流量、心拍出量、血圧を維持し続けることが一層困難になる。暑熱環境(約25℃)でハーフマラソンに参加するランナーは、エイドステーションで定期的に水分補給を行っても、発汗によって体重の2~3%の水分を容易に失いうる(48)。寒冷環境では、体内の水分量の喪失は体重の1~2%に留まるが、パフォーマンスの低下は避けられず(55)、外気温の上昇につれてパフォーマンスの低下も大きくなる(35)。暑熱下のランニングにおける定期的な水分摂取は脱水状態を最小限に抑えるが、発汗による水分喪失は完全には補えないことが多い。例えば、暑熱環境、温暖環境、寒冷環境で、鍛錬された女性ランナーにマラソンペースで30kmのトレッドミルランニングを行なわせ、水分損失量の平均約70%を補給させたが、体重の約3%が失われた(6)。また、暑熱環境での2時間のランニング中に、さらに高頻度で水分摂取を行なわせたところ、複数のアスリートが胃腸の不快感を訴えた(11)。これは、暑熱環境のレースにおいて、発汗による水分喪失量に見合う水分補給を行なうことの難しさを示唆している。とはいえ、レース前の適切な水分補給とレース中の適宜の水分補給は、暑熱環境における中心血流量の低下と高体温に伴うパフォーマンスの低下を最小限に抑えることに役立つであろう(60)。

暑熱下でのランニングパフォーマンスを向上させる暑熱順化

暑熱順化、すなわち運動熱ストレスに繰り返し曝すことは、暑熱環境で労働する人々の作業能力を持続させることを目的として、職業環境において開発された方法である(31,53)。5~14日間にわたって、暑熱環境で中強度

の運動を60~100分間実施した結果、安静時深部体温が下がるとともに運動時の深部体温の上昇率が低下し、一定の作業負荷における心拍数が減少し、発汗能が向上し、血漿量が増加した(59)。放熱能力の向上は蓄熱量を減少させ、深部体温の上昇率の低下は、一定強度の運動において疲労までの時間を延長する(42)。アスリート自身のペースで運動させると、放熱能力の向上は運動強度を上昇させ、代謝熱産生の増加にも耐えさせる(49)。これらの適応は、体温調節の負担を減らして、暑熱下の身体パフォーマンスを向上させる。

職業環境において開発された暑熱順化の手順は、暑熱下でレースに参加するアスリートの準備にも転用できる。多様な暑熱順化手順とそのスケジュール化によって、暑熱下のランニングパフォーマンスを向上させることができると考えられる(49)。暑熱順化は、暑熱/乾燥または温暖/湿潤条件に設定された環境室を利用して行なうことができる。あるいは、温暖または暑熱環境で屋外ランニングを行なって、自然順化させることも可能である。さらに、温暖環境で断熱ウェアを重ね着(厚着)することによっても可能であろう(14,15,58)。実験室で行なわれる従来の暑熱順化方法には、環境条件を正確に制御できるという利点がある。しかし、暑熱下の競技に向けてチームとして身体準備を行なわせるには、暑熱下の屋外運動のほうが実用的かもしれない。普段は温暖な環境に住んでトレーニングしており、環境室を利用する機会がないアスリートも、厚着することで暑熱順化の恩恵にあずかれる可能性がある(12-15,58)。しかし、重ね着に選ぶウェアと屋外環境を考慮する必要がある。重いウェアと屋内のトレッドミルランニングを利用した研究は、生理機能への負担が高まり(15)、熱耐性が向上した(14)ことを報告している。しかし、軽いウェアと屋外運動を利用

した研究では、熱取得の変化が小さく(58)、熱耐性に変化が認められなかった(57)。

暑熱順化を達成するには、3つの重要な刺激に繰り返し曝す必要がある。すなわち、内部体温の上昇(20)、皮膚温度の上昇(50)、皮膚表面の汗の産生(4,27)である。比較的寒冷な環境で高強度のトレーニングを行なっているアスリートは、これら3つの刺激に定期的に曝されている可能性が高いため、身体活動の少ない人々と比較すると「ある程度の暑熱順化」をすでに経験していると考えられる(25)。したがって、暑熱下のレースに向けて鍛錬されたランナーは、わずか5日間で暑熱順化による体温調整効果を得ることができるが(23,24,39)、鍛錬されていない人々はより長い暑熱順化期間(7~14日)を必要とする。運動熱ストレスに曝すことは、寒冷環境でのランニングよりも大きなトレーニングストレスをもたらすため、曝露量は、暑熱順化の効果が得られる必要最小限とすることが重要である。特に、暑熱順化は、競技会前のテーパリング期に実施されることが一般的であるためこの点は重要である(49)。

暑熱順化のための運動熱ストレスへの曝露は、テーパリング期のアスリートにとって過度のストレスとなることが懸念される。そのため、受動的な暑熱順化方策が考案された(29)。推奨されている方法は、運動直後の深部体温が上昇している状態で、サウナや温水浴などの受動的な暑熱順化を実施することである(29)。最近の研究によると、よく鍛錬された男性ランナーにおいても(65)、ある程度鍛錬された男性ランナーにおいても(64)、温暖環境における40分間のトレッドミルランニング直後に、6日連続で温水浴を行なわせただけで確実に熱耐性が向上し、血漿量が増加した。ある研究では、鍛錬された男性ランナーを対象として、3週間にわたって運動後に湿式サウナを利用さ

せたところ、血漿量が増加し、温暖環境における5,000m走のシミュレーションでパフォーマンスが向上した(56)。特に血漿量の増加は、広く認められているわけではないものの(40,45)、寒冷環境の最大パフォーマンスをも向上させる可能性がある(36,56)。

以上のことから、暑熱下でパフォーマンスの低下をもたらす生理学的要因は、いずれも、暑熱順化によって緩和される可能性がある。基礎となる体温の低下と運動中の体温上昇率の低下は、高体温に陥る危険を減らす。発汗反応の増大は、深部体温と皮膚体温の熱勾配を拡大して熱交換を促進する。血漿量の増加は皮膚と筋の血流量を増加して、発汗反応を増大させる(図3)。中程度の熱ストレスでは、暑熱順化によって、寒冷環境と同程度にパフォーマンスが維持されると考えられる。しかし、熱ストレスが高ければ、暑熱順化は関連するパフォーマンスの低下を緩和することはできても、完全に打ち消すことはできない(36)。

まとめ

高強度ランニング中に生み出される大量の代謝熱を相殺するには、適切な量の熱を環境に放出する必要がある。身体温度と環境温度の差が縮小すると、放熱能力は抑制され、多くの代謝熱が蓄積されて体温が上昇する。これは、たとえ外気温が比較的低くても、ランニングパフォーマンスに影響が生じて、外気温が上昇するにつれてパフォーマンスが低下することを意味している。その一次因子には、内部体温の上昇、皮膚血流量の増加、体温調節のための発汗による水分の喪失が含まれる。能動的あるいは受動的に繰り返し熱ストレスに曝すことによって暑熱順化を行えば、関連するパフォーマンスの低下を最小限に抑えることが可能である。◆

References

- Adams WC, Fox RH, Fry AJ, MacDonald IC. Thermoregulation during marathon running in cool, moderate, and hot environments. *J Appl Physiol* 38: 1030-1037, 1975.
- Armstrong LE, Casa DJ, Millard-Stafford M, et al. ACSM position stand: Exertional heat illness during training and competition. *Med Sci Sports Exerc* 39: 556-572, 2007.
- Arngrimsson SA, Stewart DJ, Borrani F, Skinner KA, Cureton KJ. Relation of heart rate to percent VO2 peak during submaximal exercise in the heat. *J Appl Physiol* 94: 1162-1168, 2003.
- Buono MJ, Numan TR, Claros RM, Brodine SK, Kolkhorst FW. Is active sweating during heat acclimation required for improvements in peripheral sweat gland function? *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 297: R1082-R1085, 2009.
- Byrne C, Lee JKW, Chew SAN, Lim CL, Tan EYM. Continuous thermoregulatory responses to mass-participation distance running in heat. *Med Sci Sport Exerc* 38: 803-810, 2006.
- Chevront SN, Haymes EM. Ad libitum fluid intakes and thermoregulatory responses of female distance runners in three environments. *J Sports Sci* 19: 845-854, 2001.
- Chevront SN, Sawka MN. Physical exercise and exhaustion from heat strain. *J Korean Soc Living Environ Syst* 8: 134-145, 2001.
- Chou TH, Allen JR, Hahn D, Leary BK, Coyle EF. Cardiovascular responses to exercise when increasing skin temperature with narrowing of the core-to-skin temperature gradient. *J Appl Physiol* 125: 697-705, 2018.
- Christensen CL, Ruhling RO. Thermoregulatory responses during a marathon. A case study of a woman runner. *Br J Sports Med* 14: 131-132, 1980.
- Cuddy JS, Hailes WS, Ruby BC. A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. *J Therm Biol* 43: 7-12, 2014.
- Daries HN, Noakes TD, Dennis SC. Effect of fluid intake volume on 2-h running performances in a 25 degrees C environment. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1783-1789, 2000.
- Dawson B. Exercise training in sweat clothing in cool conditions to improve heat tolerance. *Sports Med* 17: 233-244, 1994.
- Dawson B, Pyke F. Artificially induced heat acclimation of team game players with

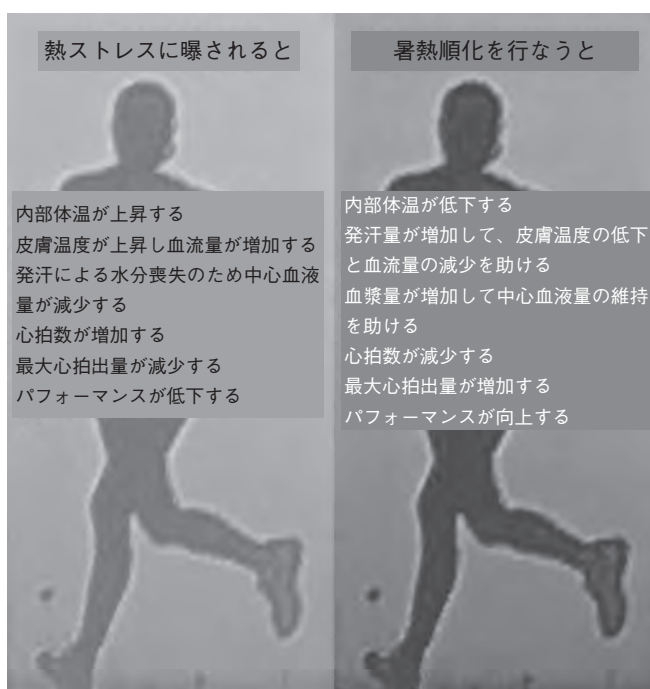


図3 熱ストレスがランニングパフォーマンスの低下をもたらす生理学的要因：暑熱順化によって、体温調節と心臓血管系の負担を減らして、暑熱下のパフォーマンスを向上させることが可能である。

- sweat clothing: 1. Responses to wearing sweat clothing during exercise in cool conditions. *J Hum Mov Stud* 15: 171–183, 1988.
14. Dawson B, Pyke FS, Morton AR. Improvements in heat tolerance induced by interval running training in the heat and in sweat clothing in cool conditions. *J Sports Sci* 7: 189–203, 1989.
 15. Ely BR, Blanchard LA, Steele JR, et al. Physiological responses to overdressing and exercise-heat stress in trained runners. *Med Sci Sports Exerc* 50: 1285–1296, 2018.
 16. Ely BR, Cheuvront SN, Kenefick RW, Sawka MN. Aerobic performance is degraded, despite modest hyperthermia, in hot environments. *Med Sci Sports Exerc* 42: 135–141, 2010.
 17. Ely BR, Ely MR, Cheuvront SN, et al. Evidence against a 40° C core temperature threshold for fatigue in humans. *J Appl Physiol* 107: 1519–1525, 2009.
 18. Ely MR, Cheuvront SN, Montain SJ. Neither cloud cover nor low solar loads are associated with fast marathon performance. *Med Sci Sports Exerc* 39: 2029–2035, 2007.
 19. Ely MR, Cheuvront SN, Roberts WO, Montain SJ. Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc* 39: 487–493, 2007.
 20. Fox RH, Goldsmith R, Kidd DJ, Lewis HE. Acclimatization to heat in man by controlled elevation of body temperature. *J Physiol* 166: 530–547, 1963.
 21. Gagge AP, Gonzalez RR. Mechanisms of heat exchange: Biophysics and physiology. In: *Comprehensive Physiology*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
 22. Galloway SD, Maughan RJ. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1240–1249, 1997.
 23. Garrett AT, Goosens NG, Rehner NJ, et al. Short-term heat acclimation is effective and may be enhanced rather than impaired by dehydration. *J Hum Biol* 26: 311–320, 2014.
 24. Gibson OR, Mee JA, Tuttle JA, et al. Isothermic and fixed intensity heat acclimation methods induce similar heat adaptation following short and long-term timescales. *J Therm Biol* 49–50: 55–65, 2015.
 25. Gisolfi CV, Cohen JS. Relationships among training, heat acclimation, and heat tolerance in men and women: The controversy revisited. *Med Sci Sports* 11: 56–59, 1979.
 26. González-Alonso J, Crandall CG, Johnson JM. The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J Physiol* 586: 45–53, 2008.
 27. Gonzalez RR, Berglund LG, Gagge AP. Indices of thermoregulatory strain for moderate exercise in the heat. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 44: 889–899, 1978.
 28. Hales J, Hubbard R, Gaffin S. Limitations of heat tolerance. In: *Handbook of Physiology*. Fregley M, Blatteis C, eds. New York, NY: Oxford University Press, 1996.
 29. Heathcote SL, Hassmén P, Zhou S, Stevens CJ. Passive heating: Reviewing practical heat acclimation strategies for endurance athletes. *Front Physiol* 9: 1851, 2018.
 30. El Helou N, Tafflet M, Berthelot G, et al. Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS One* 7: e37407, 2012.
 31. Horvath SM, Shelley WB. Acclimatization to extreme heat and its effect on the ability to work in less severe environments. *Am J Physiol* 146: 336–343, 1946.
 32. Junge N, Jorgensen R, Flouris AD, Nybo L. Prolonged self-paced exercise in the heat—Environmental factors affecting performance. *Temperature* 3: 539–548, 2016.
 33. Kellogg DL, Johnson JM, Kosiba WA. Competition between cutaneous active vasoconstriction and active vasodilation during exercise in humans. *Am J Physiol* 261: H1184–H1189, 1991.
 34. Kellogg DL, Pêrgola PE, Piest KL, et al. Cutaneous active vasodilation in humans is mediated by cholinergic nerve cotransmission. *Circ Res* 77: 1222–1228, 1995.
 35. Kenefick RW, Cheuvront SN, Palombo LJ, Ely BR, Sawka MN. Skin temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance. *J Appl Physiol* 109, 2010: 79–86.
 36. Lorenzo S, Halliwill JR, Sawka MN, Minson CT. Heat acclimation improves exercise performance. *J Appl Physiol* 109, 2010: 1140–1147.
 37. Marino FE. Anticipatory regulation and avoidance of catastrophe during exercise-induced hyperthermia. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* 139: 561–569, 2004.
 38. Maron MB, Wagner JA, Horvath SM. Thermoregulatory responses during competitive marathon running. *J Appl Physiol* 42: 909–914, 1977.
 39. Mee JA, Gibson OR, Doust J, Maxwell NS. A comparison of males and females' temporal patterning to short- and long-term heat acclimation. *Scand J Med Sci Sport* 25: 250–258, 2015.
 40. Minson CT, Cotter JD. CrossTalk proposal: Heat acclimatization does improve performance in a cool condition. *J Physiol* 594: 241–243, 2016.
 41. Montain SJ, Ely MR, Cheuvront SN. Marathon performance in thermally stressing conditions. *Sports Med* 37: 320–323, 2007.
 42. Nielsen B, Hales JR, Strange S, et al. Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J Physiol* 460: 467–485, 1993.
 43. Nielsen B, Nybo L. Cerebral changes during exercise in the heat. *Sports Med* 33: 1–11, 2003.
 44. Nybo L. Hyperthermia and fatigue. *J Appl Physiol* 104: 871–878, 2008.
 45. Nybo L, Lundby C. CrossTalk opposing view: Heat acclimatization does not improve exercise performance in a cool condition. *J Physiol* 594: 245–247, 2016.
 46. Nybo L, Nielsen B. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol* 91: 1055–1060, 2001.
 47. Pandolf KB, Goldman RF. Convergence of skin and rectal temperatures as a criterion for heat tolerance. *Aviat Space Environ Med* 49: 1095–1101, 1978.
 48. Pereira ER, de Andrade MT, Mendes TT, et al. Evaluation of hydration status by urine, body mass variation and plasma parameters during an official half-marathon. *J Sports Med Phys Fitness* 57: 1499–1503, 2017.
 49. Racinais S, Alonso JM, Coutts AJ, et al. Consensus recommendations on training and competing in the heat. *Br J Sports Med* 49: 1164–1173, 2015.
 50. Regan JM, Macfarlane DJ, Taylor NA. An evaluation of the role of skin temperature during heat adaptation. *Acta Physiol Scand* 158: 365–375, 1996.
 51. Roberts WO. Determining a “do not start” temperature for a marathon on the basis of adverse outcomes. *Med Sci Sport Exerc* 42: 226–232, 2010.
 52. Robinson S. Temperature regulation in exercise. *Pediatrics* 32(Suppl): 691–702, 1963.
 53. Robinson S, Turrell ES, Belding HS, Horvath SM. Rapid acclimatization to work in hot climates. *Am J Physiol Content* 140: 168–176, 1943.
 54. Sawka MN, Francesconi RP, Young AJ, Pandolf KB. Influence of hydration level

and body fluids on exercise performance in the heat. *JAMA* 252: 1165-1169, 1984.

55. Sawka MN, Montain SJ, Latzka WA. Hydration effects on thermoregulation and performance in the heat. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 128: 679-690, 2001.
56. Scoon GS, Hopkins WG, Mayhew S, Cotter JD. Effect of post-exercise sauna bathing on the endurance performance of competitive male runners. *J Sci Med Sport* 10: 259-262, 2007.
57. Stevens CJ, Heathcote SL, Plews DJ, Laursen PB, Taylor L. Effect of two-weeks endurance training wearing additional clothing in a temperate outdoor environment on performance and physiology in the heat. *Temperature* 5: 267-275, 2018.
58. Stevens CJ, Plews DJ, Laursen PB, Kittel AB, Taylor L. Acute physiological and perceptual responses to wearing additional clothing while cycling outdoors in a temperate environment: A practical method to increase the heat load. *Temperature* 4: 414-419, 2017.
59. Taylor NAS. Human heat adaptation. In: *Comprehensive Physiology* (Vol. 4). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2014. pp. 325-365.
60. Trangmar SJ, González-Alonso J. Heat, hydration and the human brain, heart and skeletal muscles. *Sports Med* 49: 69-85, 2019.
61. Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD. The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol* 574: 905-915, 2006.
62. Vihma T. Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol* 54: 297-306, 2010.
63. Wingo JE, Lafrenz AJ, Ganio MS, Edwards GL, Cureton KJ. Cardiovascular drift is related to reduced maximal oxygen uptake during heat stress. *Med Sci Sports Exerc* 37: 248-255, 2005.
64. Zurawlew MJ, Mee JA, Walsh NP. Post-exercise hot water immersion elicits heat acclimation adaptations in endurance trained and recreationally active individuals. *Front Physiol* 9: 1824, 2018.
65. Zurawlew MJ, Walsh NP, Fortes MB, Potter C. Post-exercise hot water immersion induces heat acclimation and improves endurance exercise performance in the heat. *Scand J Med Sci Sports* 26: 745-754, 2016.

From *Strength and Conditioning Journal*
Volume 42, Number 1, pages 90-96.

著者紹介



Brett R. Ely :
Salem State Universityのスポーツ動作学の助教。



Matthew R. Ely :
University of Oregonの人体生理学の博士課程に在籍。