

中性温環境下における降雨が走運動中の ヒトの体温調節・エネルギー代謝反応に及ぼす影響

伊 藤 僚

日本福祉大学 全学教育センター

Effects of Rain on Thermoregulatory and Metabolic Responses while Running in a Thermoneutral Condition in Humans

Ryo ITO

University Educational Center, Nihon Fukushi University

Keywords : 中性温環境, 降雨, 体温, エネルギー代謝

Abstract

Title: Effects of Rain on thermoregulatory and metabolic responses while running in a thermoneutral condition in humans.

Introduction: Environmental factors tend to influence the performance of individuals who exercise for extended periods. We previously showed that rain increased energy expenditure and blood lactate concentrations and decreased the core temperature during exercise in the cold¹⁾. However, there was a little study about physiological responses during exercise in the rain.

Purpose: The present study aimed to determine thermoregulatory and metabolic responses while running exercise in the thermoneutral condition.

Methods: 7 healthy men ran on a treadmill at 70% VO_{2max} intensity for 30 min in a climatic chamber at an ambient temperature of 24 °C in the presence (RAIN) or absence (CON) of 30 mm/h of precipitation. Rectal temperature, mean skin temperature, oxygen consumption, heart rate perceived exertion and blood lactate concentrations were measured.

Results: Rectal temperature were significantly lower ($p < 0.05$) in RAIN than in CON at 5 min during exercise. Mean skin temperature were significantly lower ($p < 0.05$) in RAIN than in CON during exercise. Oxygen consumption, heart rate and perceived exertion were not significantly differences between RAIN and CON. Blood lactate concentrations were significantly higher ($p < 0.05$) in RAIN than in CON.

Conclusion: When exercising in a thermoneutral condition, rain cooled body core and increase the blood lactate concentrations via cold stress at the initial period of exercise.

要旨

ヒトは屋外で運動を行う際に、様々な環境に暴露される。筆者はこれまでの研究で降雨を伴う寒冷環境でヒトが走運動を行った際、核心温の低下と酸素摂取量、血中乳酸濃度の上昇が起こることを報告した。しかしながらこれまでに降雨環境を設定し、運動中の生理的応答をみた研究は少ない。そこで本研究は降雨を伴った中性温環境が運動中の体温調節、エネルギー代謝反応に及ぼす影響を検討した。被験者は健康な男性7名とし、環境温24℃で制御された人工気象室内のトレッドミル上で70%VO_{2max}強度の走運動を30分間、降雨あり(RAIN) 降雨なし(CON) の2条件で行った。尚、運動中は各被験者の走速度と等しい向かい風を被験者の前方から当てた。測定項目は直腸温、皮膚温、酸素摂取量、心拍数、主観的運動強度、血中乳酸濃度とした。その結果、RAINの直腸温は運動開始直後、平均皮膚温は運動中、CONと比較して有意に低い値を示し(p<0.05)、血中乳酸濃度は運動開始10分時に有意に高い値を示した(p<0.05)。以上のことから、中性温環境下における降雨は、i)蓄熱量および、運動による熱産生量が少ない運動開始初期に核心温の低下を引き起こす、ii)筋温の低下あるいは筋血流量の減少によって無酸素性エネルギー供給機構への寄与が高まり、その結果、血中乳酸濃度が上昇することが示唆された。

緒言

屋外で行う運動は暑熱環境や寒冷環境に加えて、雨や風などの悪天候の中で行われることがある。筆者は降雨環境に着目し、これまでの研究で降雨をともなった寒冷環境(5℃)が走運動中のヒトの体温調節およびエネルギー代謝反応に与える影響を検討した結果、核心温の低下、エネルギー消費量の増加、血中乳酸濃度の上昇が起こることを明らかにし、降雨による身体冷却は持久的運動能を低下させる可能性を報告した¹⁾。しかしながら、これまでに降雨環境を模擬し、降雨による身体冷却が運動中のヒトに及ぼす生理的応答を検討した報告は少ない^{2)~7)}。これは降雨や風を厳密に再現できる実験施設が少なく、環境温度を変えて系統的にヒトの生理的応答を検討することが困難であることが原因と考えられる。そこで、本研究の目的は温度と湿度に加えて、雨と風が再現可能な人工気象室(TBR-12A4PX, ESPEC)を用いて、中性温環境下の降雨が運動中のヒトにおよぼす生理

的影響を明らかにすることを目的とした。中性温環境下では主に皮膚血管収縮運動による体温調節が機能的に働き、寒冷環境下でみられるエネルギー消費量の増加や筋出力の低下といった生体負担は少ない。しかしながら、実際の屋外運動では、無風状態であっても移動速度と等しい向かい風を受けている。全身の皮膚や衣服が雨で濡れ、そこへ走速度分の風を受けることで蒸発性熱放散が増加し⁸⁾、また、水の熱伝導率は空気の約25倍と高いことから⁹⁾中性温環境であっても核心温の低下やエネルギー消費量の増加が起こることが実験仮説として挙げられる。

方法

A. 被験者

被験者は、運動習慣のある健康な男性7名であった(身長:175.5±3.5cm, 体重:68.0±4.0kg, 年齢:23.6±0.8歳, 体脂肪率:13.9±3.3%, VO_{2max}:52.0±0.8 mL/kg/min [平均値±標準偏差])。高強度運動やアルコールの摂取は実験前日から禁止とした。運動時の服装はポリエステル100%の半袖Tシャツとハーフパンツに統一した。被験者には実験の趣旨及び内容、予想し得る苦痛やリスクについて十分な説明を行い、承諾書への署名を得た。また本研究は中京大学大学院体育学研究科倫理委員会の承認を得た。

B. 実験手順

被験者は環境温24℃、相対湿度50%に設定された人工気象室にて5分間の座位安静とし、その後、70%VO_{2max}強度の走運動をトレッドミル上で30分間、RAIN(降雨あり30mm/h)、CON(降雨なし)の2条件でおこなった。風は走速度と等しい向かい風を被験者の前方より当てた。RAINとCONは無作為の順序で行い、各条件の間隔は1週間とした。

C. 測定項目

直腸温(T_{re})と皮膚温(上腕部、胸部、大腿部、下腿部)は、データ収集型ハンディタイプ温度計(LT-8, グラム)を使用した。T_{re}は直腸温用ワセリン(白色ワセリン, アクラス)を塗ったプローブカバー(プローブカバー, 日本光電)を装着した直腸温用プローブを肛門より10~12cm挿入した。平均皮膚温(T_{sk})は次式⁷⁾より算出した。T_{sk}=0.3(胸部皮膚温+上腕部皮膚温)+0.2(大腿部皮膚温+下腿部皮膚温)。ふるえの有無は10

分毎に被験者に申告させた。酸素摂取量 (VO_2)、呼吸商 (RQ) は呼吸代謝測定装置 (AE300S, ミナト) を使用した。心拍数 (HR) は、ベッドサイドモニタ (BS M-2401, 日本光電) を使用して胸部双子極誘導にて測定した。 T_{re} , T_{sk} , VO_2 , RQ のいずれも 30 秒毎に記録し、5 分毎の平均値を求めた。Borg scale⁹⁾ による主観的運動強度 (RPE) を 10 分毎に被験者に申告させた。血中乳酸濃度 (La) は、運動前と運動開始 10, 20, 30 分に指先より採血し、乳酸分析装置 (BIOSEN5030, EKF) にて分析した。

D. 人工気象室

本研究は中京大学情報理工学部内の雨、風、温度、湿度が再現可能な人工気象室 (TBR-12APX, S&ME) を使用して行った。雨は被験者前方の高さ 2.15m の高さに設置された 3 つのノズルから噴出し、降雨量は 30 mm/h とした。風は前方の壁に設置された 1.05m² の網状パネルから送風した。

E. 統計処理

測定値は全て平均値 \pm 標準偏差で示した。条件間の平均値の差の検定は、反復測定による二元配置分散分析を用いて行い、有意差があった場合に Fisher の最小優位差法により多重比較検定を行った。有意差の検定には、いずれも危険率 5% 未満を採用した。

結果

Fig. 1 に T_{re} の経時的変化を示した。RAIN の T_{re} は運動開始 5 分まで低下し、CON と比較して有意に低い値を示した ($p < 0.05$)。運動開始 5 分以降の T_{re} は RAIN と CON の間に有意な差はなかった。Fig. 2 に T_{sk} の経時的変化を示した。RAIN の T_{sk} は運動開始 5 分から運動終了時まで CON と比較して有意に低い値を示した ($p < 0.05$)。 VO_2 , RQ, RPE は条件間に有意な差は無かった。Fig. 3 に La の経時的変化を示した。La は両条件とも運動開始 10 分まで上昇し、その後、運動終了時まで下降した。La は運動開始 10 分時に RAIN が CON と比較して有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

考察

降雨を伴った寒冷環境下における運動時のヒトの生理的反応には核心温の低下、エネルギー消費量の増加、血

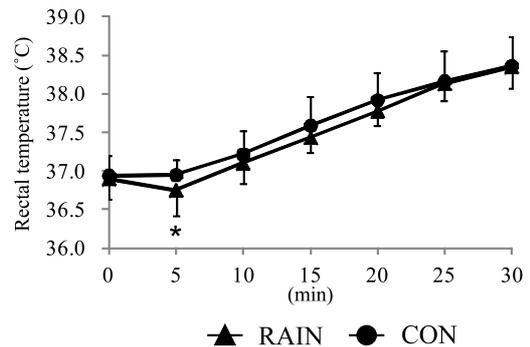


Fig. 1 Rectal temperature () while running for 30 min at 70% VO_{2max} in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation at 24 . Values are means \pm SD (n=7)

*Significantly different from control ($p < 0.05$).

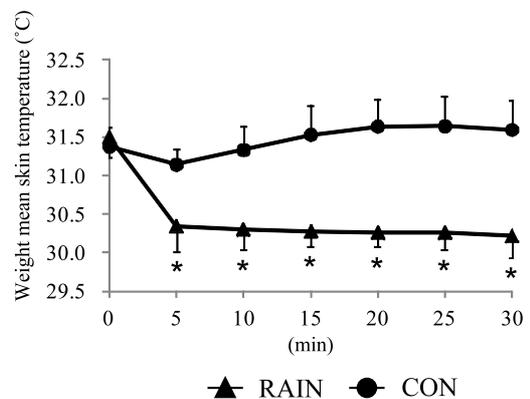


Fig. 2 Weighted mean skin temperature () while running for 30 min at 70% VO_{2max} in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation at 24 . Values are means \pm SD (n=7)

*Significantly different from control ($p < 0.05$).

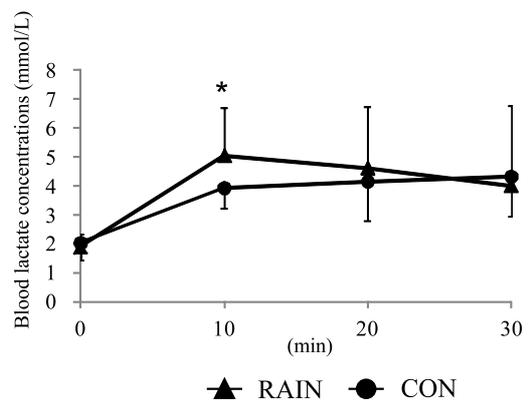


Fig. 3 Blood lactate concentrations (mmol/L) while running for 30 min at 70% VO_{2max} in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation at 24 . Values are means \pm SD (n=7)

*Significantly different from control ($p < 0.05$).

中乳酸濃度の上昇などがこれまでに報告されている。本研究は中性温環境下における降雨が走運動中のヒトに及ぼす生理的影響について検討した結果、降雨環境の T_{re} 、 T_{sk} は降雨なしと比較して有意に低い値を示し、 La は有意に高い値を示した。

T_{re} は CON において運動開始直後から上昇したが、RAIN の T_{re} は安静時から運動開始5分にかけて一時的に0.3の低下を示し、その後、上昇した。Hong と Nadel⁹⁾ は寒冷環境下で運動を開始した直後には皮膚血管内で冷やされた血液が運動によって身体深部に移りその結果、核心温が一時的に低下する現象 (initial fall) を報告している。RAIN の T_{sk} は安静時から運動開始5分にかけて1.1の低下を示しており、それに伴い皮膚血管内の血液も冷却されていたと推測される。このことから RAIN でみられた T_{re} の一時的な低下は initial fall によるものと考えられる。またヒトは寒冷環境に暴露されると交感神経活動の亢進により皮膚血管が収縮し、皮膚血流量が減少する。その結果、皮膚温が低下し外環境との温度勾配が減少し、身体から外部環境への熱放散が抑制される¹⁰⁾。RAIN の T_{sk} は安静時から運動開始5分にかけて約1.1低下し、その後は運動終了時まで低下し続けた。RAIN の熱放散量は皮膚血管収縮によって減少し、その結果、 T_{re} は運動開始5分以降に低下しなかったと考えられる。またの運動時の熱産生量は筋活動によって増加する。そのため運動時の核心温は運動強度の増加に伴い上昇する。Nielsen¹¹⁾ は寒冷環境下 (5以上) であってもヒトの核心温は環境条件の影響を受けず、運動強度の影響を受ける事を報告している。また菅原¹²⁾ は10の冷環境下で30分の安静の後に、70% VO_{2max} の自転車運動を30分間行った結果、運動時の皮膚温は低下し続けたにも関わらず、核心温は上昇したことを報告している。本研究も同様に、RAIN の T_{sk} は運動開始から低下を続けたが T_{re} は運動開始5分時から運動終了時まで上昇を続けた。これらのことから、RAIN の T_{re} は initial fall によって運動開始初期に一時的な低下を示すが、皮膚血管収縮による断熱性の向上と運動による体熱産生の増加によって運動終了時まで上昇したと考えられる。

一般に、軽度から中程度の一定負荷強度の運動を行った場合の酸素摂取量は運動初期に急激な増加を示し、その後、運動中はほぼ一定の値を保ち続ける¹³⁾。寒冷環境下で運動を行った場合、熱産生量の増加や運動効率の低

下によって温暖環境と比較して酸素摂取量が有意に高くなることが報告されている^{14), 15)}。降雨環境を設定した報告では Ito ら¹⁾ は降雨を伴った寒冷環境 (5) で70% VO_{2max} の運動を行った結果、降雨なしの条件と比較して、非ふるえ熱産生の増加と冷却された筋の運動能の低下が運動中の酸素摂取量の増加を引き起こすことを報告している。また Thompson and Hayward²⁾ は環境温5で1時間の歩行運動の後、濡れた衣服で4時間の歩行運動を行った結果、被験者にはふるえが確認され、酸素摂取量が増加したことを報告している。本研究では RAIN の T_{re} は運動開始5分以降からは CON と比較して有意な差はなく運動終了時まで上昇しており、さらに、実験中は被験者のふるえも確認されなかったことから、中性温環境では降雨による身体の冷却は運動中のエネルギー消費量の増加に及ぼす影響が小さいと考えられる。血中乳酸濃度の上昇は運動強度が増加すると、筋グリコーゲン分解によるエネルギー産生が増加して起こる¹⁶⁾。本研究の La は運動開始10分時に RAIN が CON と比較して有意に高い値を示している。これまでに寒冷環境下の持久的運動は血中乳酸濃度を上昇させることが報告されている¹⁷⁻¹⁹⁾。Weller⁴⁾ らは寒冷環境下で身体が濡れた状態で低強度歩行運動を行うと皮膚血管収縮によって活動筋への血液分配量が減少し、無酸素性エネルギー供給機構への寄与が高まること、また寒冷刺激によってエピネフリンの分泌量が増加し、筋グリコーゲンの分解が促進されるため、身体が濡れていない中性温環境と比較して血中乳酸濃度が有意に高い値を示すと報告している。同様に、本研究においても T_{sk} は運動中、RAIN が CON と比較して有意に低い値を示しており、皮膚血管収縮による無酸素性エネルギー供給機構が高まったこと、さらにはエピネフリンの分泌が増加したことによって筋グリコーゲンの分解が促進された可能性が原因と考えられる。また Ito ら¹⁾ は降雨を伴った環境温5の中で70% VO_{2max} の走運動を30分間行くと、降雨が運動中の筋を冷却することで筋出力が低下、その結果、動員される筋線維数が増加し、 LA が運動開始時から運動終了時まで降雨なしの条件と比較して有意に高い値を示すことを報告している¹⁾。本研究は Ito ら¹⁾ の採用した運動強度、運動様式、運動時間と同じ条件設定し、環境温を中性温環境である24に設定して行った。このことから中性温環境であっても、降雨を伴うと運動開始初期には核心温や筋温は十分に上昇しておらず、RAIN の La は運動開始10分時

に CON と比較して有意に高い値を示したと考えられる。

まとめ

本研究の目的は RAIN (環境温 24℃, 降雨あり, 80~90%RH), CON (環境温 24℃, 降雨なし, 50%RH) の2条件を設定し, 降雨が中性温環境下で運動中のヒトの体温調節反応, エネルギー代謝反応に及ぼす影響を検討することであった。その結果, RAIN と CON の間にエネルギー消費量の差はなかったが, RAIN の T_{re} は運動開始初期に一時的に低下し, CON と比較して有意に低い値を示した。また, 血中乳酸濃度は運動開始 10 分時に RAIN の血中乳酸濃度が CON と比較して有意に高い値を示した。したがって, 中性温環境における降雨は運動開始初期において運動能の低下を引き起こす可能性が示唆された。本研究は各被験者に対し, 走速度分の向い風を設定し実験を遂行した。このことは実際の屋外環境では無風状態を意味する。そのため今後は屋外環境で受ける風を考慮し, 被験者が暴露される風の速度を増加させ実験を行う予定である。風速が増加することで体熱放散量が増加し, 体温の低下や運動能の低下が引き起こされると考えられる。

参考文献

- Ito, R., Nakano, M., Amano, M. and Matsumoto, T. (2013): Effect of rain on energy metabolism while running in a cold environment. (in press).
- Thompson, R. L. and Hayward, J. S. (1996): Wet-cold exposure and hypothermia: thermal and metabolic responses to prolonged exercise in rain. *J Appl Physiol.*, 81: 1128-1137.
- Tikusis, P., Ducharme, M. B., Moroz, D. and Jacobs, I. (1999): Physiological responses of exercised-fatigued individuals exposed to wet-cold conditions. *J Appl Physiol.*, 86: 1319-1328.
- Weller, A. S, Millard, C. E., Stroud, M. A, Greenhaff, P. L. and Macdonald, I. A. (1997): Physiological responses to cold stress during prolonged intermittent low- and high-intensity walking. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.*, 272: R2025-R2033.
- Mora-Rodriguez, R., Del Coso, J., Aguado-Jimenez, R. and Estevez, E. (2007): Separate and combined effects of airflow and rehydration during exercise in the heat. *Med Sci Sports Exerc.*, 39: 1720-1726.
- Boutelier, C., Bougues, L. and Timbal, J. (1977): Experimental study of convective heat transfer coefficient for the human body in water. *J Appl Physiol.*, 42: 93-100.
- Ramanathan, N. L. (1964): A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *J Appl Physiol.*, 19: 531-533.
- Borg, G. A. V. (1973): Perceived exertion: a note on "history" and methods. *Med Sci Sports Exerc.*, 5: 90-93.
- Hong, S. I. and Nadel, E. R. (1979): Thermogenic control during exercise in a cold environment. *J Appl Physiol.*, 47: 1084-1089.
- Stocks, J. M., Taylor, N. A., Tipton, M. J. and Greenleaf, J. 3E. (2004): Human physiological responses to cold exposure. *Aviat Space Environ Med.*, 75: 444-457.
- Nielsen, M. (1938): Die Regulation der Kopertemperatur bei Muskelarbeit. *Skand Arch Physiol.*, 79: 193-230.
- 菅原正志, 田井村明博, 大渡伸, 上平憲 (1999): 寒冷環境下運動負荷時の体温調節反応と寒冷血管反応に及ぼす体力水準の差異. *デサントスポーツ科学*, 20: 140-147.
- McArdle, W. D., Katch, F. I. and Katch, V. L. (1992): 運動生理学 エネルギー・栄養・ヒューマンパフォーマンス. 杏林書店, 東京, 106-123.
- Galloway, S. D. and Maughan, R. J. (1997): Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc.*, 29: 1240-1249.
- Doubt, T. J. (1991): Physiology of exercise in the cold. *Sports Med.*, 11: 367-381.
- Gollnick, P. D., Piehl, K. and Saltin B. (1974): Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedaling rates. *J Physiol.*, 24: 45-57.
- Beelen, A. and Sargeant, A. J. (1991): Effect of lowered muscle temperature on the physiological response to exercise in men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.*, 63: 387-392.
- Doubt, T. J. and Hsieh, S. S. (1991): Additive effects of caffeine and cold water during sumaximal leg exercise. *Med Sci Sports Exerc.*, 23: 435-442.
- Jacobs, I., Romet, T. T. and Kerrigan-Brown, D. (1985): Muscle glycogen depletion during exercise at 9 and 21°C. *Eur J Appl Physiol.*, 54: 35-39.