

中京大学博士審査学位論文
大学院体育学研究科

論文題目：降雨による身体冷却が走運動中の
ヒトの体温・エネルギー代謝に及ぼす影響
Effects of rain on thermal and metabolic
responses while running exercise in humans.

2016年3月19日学位授与

伊藤 僚

目次

構成	1
第1章 序論	2
第1節 降雨環境下の運動・スポーツ	3
第2節 身体・衣服の濡れを原因とする身体冷却が運動中の ヒトに及ぼす影響 ～これまでの報告と研究方法～	4
第3節 寒冷環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響	7
第4節 暑熱環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響	8
第2章 寒冷環境下における降雨が走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に 及ぼす影響	11
第1節 目的	12
第2節 方法	12
第3節 結果	15
第4節 考察	15
第5節 まとめ	18
第3章 暑熱環境下における降雨が走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に 及ぼす影響	19
第1節 目的	20
第2節 方法	20

第3節 結果	22
第4節 考察	22
第5節 まとめ	25
第4章 総括	26
第1節 本研究のまとめ	27
第2節 結論	28
図表	29
参考文献	46
謝辞	56

構成

本論文は以下の 2 編により構成されている。

1. Effect of rain on energy metabolism while running in a cold environment.

[第 2 章を構成]

R. Ito, M. Nakano, M. Yamane, M. Amano, T. Matsumoto

International Journal of Sports Medicine. 2013; 34(8): 707-711. doi: 10.1055/s-0032-1331770. Epub 2013 Jan 31.

2. Rain influences the physiological and metabolic responses to exercise in hot conditions. [第 3 章を構成]

R. Ito, N. Yamashita, E. Suzuki, T. Matsumoto

Journal of Sports Sciences. 2015; 33(9): 892-898. doi: 10.1080/02640414.2014.977938. Epub 2015 Jan 2.

第 1 章

序論

第 1 節 降雨環境下の運動・スポーツ

第 2 節 身体・衣服の濡れを原因とする身体冷却が運動中のヒトに及ぼす影響
～これまでの報告と研究方法～

第 3 節 寒冷環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響

第 4 節 暑熱環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響

第 5 節 本研究の目的

第1節 降雨環境下の運動・スポーツ

近年、余暇活動が多様化する中、ヒトは様々な場所や環境で運動・スポーツを行うようになってきた。特に屋外で行う運動は好天の日に限らず暑熱環境や寒冷環境に加えて、降雨、風、雪といった気象条件の中で行われることがある。なかでも日本の降雨量は年平均1718mmで、これは世界平均の約2倍に相当し、降雨環境下で運動を行う機会は必然に多くなる。また、マラソン、サッカー、ラグビー、ホッケーの試合などの多くは、雨天中止とする明確なルールが存在していない為、雷雨や台風といった悪天候を除いては、運営側の判断によって、降雨の中でも開催されるため、降雨で体表面や衣服が濡れた状態で競技を行うことになる。特にマラソンは長時間に渡り実施されるため、天候の影響を受けやすく、天候と競技成績に関する研究が進んでいる(10,43,50,74,76,80)。しかしながら、その内容は気温、湿度、日射、風等が及ぼす影響の検討に留まっており、降雨についての報告は含まれていない。

実際に降雨による身体冷却がヒトの運動パフォーマンスや健康状態に影響を及ぼしたと考えられる事例がいくつかある。2006年東京国際女子マラソンは、平均気温10°Cの降雨環境で開催された。参加選手の多くは帽子やアームウォーマー等を着用することで防寒対策に努めていたが、試合後のインタビューでは「寒さで足が止まった」、「腕を振っても足が進まなかった」等とコメントを残している。2006年大会は平均気温が約10°Cと、ランナーにとっては決して悪環境では無かったが、降雨の無い2005年大会と比較して、上位20名のレースタイムは約4分遅くなる結果であった(72)。Elyら(19)の報告によると、マラソン競技の様な長時間運動では5~10°Cの環境温が走速度を維持する上で最適な気温であり、一方で、温暖環境は、特に走速度が速いランナーにとって速度維持が出来なくなることを明らかにしている。また2009年のトムラウシ山遭難事故は、真夏の登山で

あったため、当時の気温は 10 °C 程度と、登山を行う上では寒さの厳しい環境ではなかった。しかしながら、遭難した 18 名中 9 名が死亡した当日は、前日から雨で衣服が濡れており、さらにそこに風を受けたことで低体温症を発症していたと言われている(73)。

ヒトの体温は視床下部の視索前野が体温調節中枢の働きを担い、体温が大よそ 37 °C になるように調節されている。ヒトの運動時の体温は運動による身体内部での熱産生と身体外部からの熱負荷の両者が影響し(熱産生)、また伝導、対流、放射と蒸発(発汗)による体外への熱放散によって決定される。産熱と放熱のバランスが崩れ、産熱量が放熱量を上回ると熱が体に蓄積され体温が上昇し、一方で放熱量が産熱量を上回ると体温が低下することになる(41b)。降雨環境下の運動は全身では皮膚表面及び衣服が濡れ、運動中のヒトの熱放散量は濡れていない状態と比較して大きくなることが考えられる。Kaufman and Bothe (37)は環境温 5°C で濡れた衣服を着用していると、熱放散量が約 2 倍に増加することを報告しており、これは水の熱伝導率が空気と比較して約 25 倍と高く、皮膚表面が濡れたことで熱放散量が増加したと考えられる。また、屋外での運動はたとえ無風状態であっても運動中に移動速度分の向かい風を受けることになり(1)、風は伝導 + 対流および蒸発による熱放散量を増加させる(30,46,56,62,65)。特に寒冷環境下では風速が上がると更に体感温度が下がり寒冷ストレスが強まることが知られており“Wind chill”と呼ばれている(67)。

これらのことから身体や衣服が雨で濡れた状態で運動を行うと、熱放散量が増加し、身体冷却が起きると考えられる。さらに気温や風速、運動強度によってその影響は異なると考えられるため、基礎的なデータを蓄積していく必要がある。

第 2 節 身体・衣服の濡れを原因とする身体冷却が運動中のヒトに及ぼす影響

～これまでの報告と研究方法～

これまでに降雨環境や、衣服が濡れた状態を設定し、運動中のヒトの生理反応や運動パフォーマンスを検討した研究は筆者の知る限り極めて少ない(2,70,77)。その理由として、降雨環境の設定が可能で、さらに防水加工が施されたトレッドミルや自転車エルゴメーターが内部に設置されている人工気象室が世界的にも極めて少ないことが挙げられる。そのため、環境温や運動強度を変えた検討が継続的に行なわれていない。以下に、これまでに報告された降雨が運動中のヒトに及ぼす影響についての報告を記す。

①Ainslie ら(2)は平均気温 6.4 °C、平均風速 2.8m/s の中、実際に 12km の hill walk を実施し、その際のエネルギー消費量や体温の変化を報告している。実験は複数日に分けて行われたため、被験者 13 名のうち、5 名は降雨の中で実験運動を行った。実験中に低体温症の発症は無かったが、実験運動の半ばに設けた安静時間では多くの被験者が厳しい寒さを申告している。また、運動中のエネルギー消費量は、各被験者が任意で用意し、摂取した食物のエネルギー量と比較して有意に高い値を示した。これらのことから、レクリエーションとして実施する hill walk であっても、降雨による寒冷ストレスが体温調節やエネルギー代謝に影響を及ぼすことを明らかにした。

②Weller ら(77)は環境温 15 °C (Neutral)と 5 °C (Cold)の 2 条件を設定し、低強度歩行運動(~30% $\dot{V}O_{2max}$)を 120 分行った後、続けて中強度歩行運動(~60% $\dot{V}O_{2max}$)を 240 分、合計 360 分の歩行運動を行っている。両条件ともに実験運動中は風速 5m/s の風を被験者に当て、さらに Cold では被験者に冷水のスプレーを定期的に衣服や手足、胴体に吹きかけた。その結果、低強度歩行運動時には Cold が Neutral と比較して酸素摂取量、呼吸交換比、血漿ノルエピネフリン濃度、血中乳酸濃度が有意に高い値を示したのに対し、中強度運動時には条件間に有意な差

はなかったことが報告されている。これらのことから、中強度運動時は環境温が5°Cで身体や衣服が濡れた状態であっても、熱産生量が熱放散量を上回るため、寒冷ストレスが核心温やエネルギー代謝量、その他の生理反応へ及ぼす影響は少なかった。しかしながら、低強度運動時は体熱産生量が少なく、寒冷ストレスによって核心温の低下、ふるえ由来の熱産生量の増加、交感神経系活動の亢進、血中乳酸濃度の上昇が起きることが明らかとなった。

③Thompson ら(70)は9つのスプリンクラーと4つの送風機を設置した全長25mに渡る屋根付きの歩行用トラックを建築し、降雨がハイキング実施時の体温やエネルギー代謝に及ぼす影響について報告している。被験者は環境温5°C、風速8km/hに設定された施設内を歩行速度5.1km/hで1時間の歩行運動を行い、続けてスプリンクラーから水、送風機から風を噴出させて4時間の歩行運動を行った。実験時の服装は、一般的なハイカー(hiker)の服装とし、悪天候への備えは不十分であったという実験設定のため、レインコートを着用せずに実験運動を行った。その結果、被験者18名の内、11名は厳しい寒さのため、5時間の歩行運動を完遂できず、低体温症を発症する者もいた。実験中はスプリンクラーから水が噴出されると、ふるえの発現によって代謝率(W/kg)が40%増加し、また握力等の運動パフォーマンスも低下することを明らかにしており、今後、降雨環境下における運動時の生理反応についての知見を更に蓄積する必要性を筆者らは主張している。

これらの報告にみられるように、実験が遂行された環境は寒冷環境下に限られており、また降雨の再現方法はいずれの報告も統一されていない。さらに実験運動は歩行運動や低強度～中強度運動(16)に限られており、一般的な競技スポーツをイメージした走運動での検討はなされていない。そこで本研究は環境温、湿度

に加えて降雨と風の設定が可能である人工気象室(TBR-12A4PX、ESPEC)を使用して実験を遂行した。人工気象室内中央には防水加工が施されたトレッドミル(BM-200、S&ME)が設置されており、前方 1.5m、高さ 2.2m に設置された 5 つのノズルから粒状の水と 1.5m 前方の網状パネルから風を噴出させることが可能である。環境温、湿度、風量、雨量、運動強度を変化させることで降雨環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響について、データを系統的に収集・蓄積することが可能となる。

第 3 節 寒冷環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響

寒冷環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響として、酸素摂取量の増加、血中乳酸濃度の上昇、筋出力の低下などが報告されている(11,17,33,34,42,54)。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(24,79)、皮膚血流量が減少することで身体内部から外部環境への熱放散量を抑制する(18,69)。しかしながら、皮膚血管収縮反応だけで深部体温を維持できなくなると、体温を維持するために体熱産生量を増加させ、その結果、酸素摂取量が増加する。この熱産生にはふるえ熱産生(12)と非ふるえ熱産生(42,53)があり、ふるえ熱産生は骨格筋の不随意的収縮によって熱産生を起こす。ふるえは体熱産生量を常温環境下の約 2~3 倍に増加させるが、皮膚振動に伴う対流の促進や筋血流量の増加による断熱性の低下を招き体温調節上、効率的ではなく、また活動筋そのものが振動するため、正確な運動を阻害することが考えられる。一方、非ふるえ熱産生は交感神経活動および甲状腺ホルモン分泌の亢進に起因しており、その発生部位は主に褐色脂肪細胞や肝臓とされており(32)、骨格筋のふるえ、緊張の亢進などによる熱産生は含まれない。ふるえ熱産生と非ふるえ熱産生は運動時であっても発現し、運動中のエネルギー消費量を増加させることが知られているが、熱

放散量に見合った熱産生が行わなければ、体温は徐々に低下し、低体温症の発生に繋がる。医学的には低体温症は核心温が 35 °C を下回る状態を示し、その症状は運動パフォーマンスの低下だけに留まらず、脳、心臓、筋肉などの機能障害が生じることになり、死に至るケースもある(57)。

また寒冷環境下の運動では筋温や皮膚温の低下を由来とした運動効率の低下が起きることが報告されている。筋の収縮にはアデノシン三リン酸(ATP)がアデノシン二リン酸とリンに分解される際に放出されるエネルギーを必要とするが、温度の低下に伴い ATP の分解速度が遅くなり、寒冷環境下では核心温の低下がない場合でも、皮膚温や筋温が低下すると、運動パフォーマンスが低下することが知られている(22)。また筋温が低下すると運動単位あたりの筋出力が低下することが知られており(52)、運動継続には運動単位の動員数を増加させる必要がある。そのため、酸素摂取量の増加や血中乳酸濃度の上昇が起きることが報告されている(4)。また呼吸交換比は体内で燃焼された糖質と脂質の割合を示す値として知られているが(38)、安静時及び運動時に利用されるエネルギー基質に寒冷環境が与える影響については、未だ不明な点が多く残されている。寒冷ストレスが呼吸交換比に影響を及ぼさないとの報告が多いが(17,34,45,68,75)、呼吸交換比が低下、すなわち脂質代謝が亢進するとの報告もある(15,71)。

寒冷環境下における運動は寒冷ストレスを原因としたエネルギー消費量の増加、筋出力の低下、血中乳酸濃度の上昇を引き起こし、運動パフォーマンスの低下が起きると推察される。

第 4 節 暑熱環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響

暑熱環境下が運動中のヒトに及ぼす生理的影響について、核心温の上昇、心拍数の増加、血中乳酸濃度の上昇、運動パフォーマンスの低下などが報告されてい

る(8,21,23,27,28,29,55)。ヒトは放射、対流、伝導および、蒸発(発汗)による熱放散手段によって体外へ熱を放散している。ヒトは暑熱に暴露されると、体内温度を一定に保つための生理反応として皮膚血管拡張による皮膚血流量の増加と発汗量の増加によって熱放散を亢進させる。環境温が皮膚温を超える暑熱環境では熱移動は身体外部から内部への方向となるため、汗の蒸発による熱放散が唯一の熱放散経路となる。このため、発汗による熱放散が重要となるが、その代償として体液(主に細胞外液)が失われ、脱水状態となり、その結果、運動能が低下する。特に有酸素運動能は、体重の2%脱水から低下することが報告されている(9,64)。また発汗による血漿量の減少は、体温調節機能も低下させることが報告されている(25,48,61,63)。さらに、暑熱環境下が心臓血管系に及ぼす影響として、Cardiovascular drift が挙げられる。暑熱環境下では熱放散を維持するために、皮膚血流量が増加する。そのため静脈還流量が減少し、1回拍出量の低下が生じる。その結果、心拍出量を維持するために心拍数の増加が起きることが知られている(13,78)。暑熱環境下では主観的運動強度(RPE)が中性温環境や寒冷環境と比較して高い値を示すことが報告されているが(39)、心拍数と RPE は相関関係にあることから (6)、心拍数が高くなる暑熱環境下では RPE が高い値を示すと考えられる。Galloway ら(26)は暑熱環境が運動中のヒトの生理反応や運動パフォーマンスに及ぼす影響について、系統的な実験を行っている。その中で、 $70\% \dot{V}O_{2max}$ の自転車エルゴメーター運動を 4°C 、 11°C 、 21°C 、 31°C の環境温で行った結果、 31°C の環境温では他の環境温と比較して運動継続時間が有意に短く、さらには直腸温、心拍数、RPE の値は有意に高い値を報告している。

また、これまでに暑熱環境下の運動では、中性温環境下や冷環境下と比較して、無氣的代謝への依存度が増すと考えられており、その根拠として最大下運動中の乳酸蓄積と筋グリコーゲン貯蔵の減少が速いことが挙げられる(14,51)。また乳酸

蓄積量の増加は体温調節反応によって多量の血液が皮膚に分配され、その結果、肝血流量の減少を原因とした肝臓における乳酸の取り込み及び分解量の減少によるもの、加えて筋血流量も減少することで無機的代謝が高まることが原因として考えられている (40)。

暑熱環境下の運動は核心温の上昇や心拍数の増加、血中乳酸濃度の上昇やそれに伴う種々の複合的要因によって運動パフォーマンスに影響を及ぼすと考えられる。

第2章

寒冷環境下における降雨が走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に及ぼす影響

第1節 目的

第2節 方法

第3節 結果

第4節 考察

第5節 まとめ

第1節 目的

本研究の目的は、降雨が寒冷環境下(5 °C)で走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に及ぼす生理的影響を明らかにすることとした。

第2節 方法

1. 被験者

被験者は定期的に運動を行っている健康な成人男性7名で、年齢、身長、体重、最大酸素摂取量の平均値±標準偏差(SD)は、それぞれ 23.3 ± 2.9 歳、 168.6 ± 7.5 cm、 65.9 ± 8.1 kg、 52.0 ± 5.7 ml·kg⁻¹·min⁻¹であった。被験者にはあらかじめ実験の趣旨を説明した上で、実験参加についての同意を得た。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て実施した。

2. 実験のプロトコル

実験に先立って、トレッドミル(BM-200、S&ME)にて分速120mから2分毎に分速20mずつ負荷を漸増し、疲労困憊に至るプロトコルにて最大酸素摂取量を20°Cの実験室にて測定した。主実験は以下に示す2条件でそれぞれ別の日に無作為の順序で行った。なお、本実験は環境温度、湿度のコントロールに加えて、降雨と風を模擬できる人工気象室(TBR-12A4PX, ESPEC)で行った。各実験は1週間の間隔を空け、同じ時間帯に行った。被験者には実験前日の夕食以降の絶食を指示するとともに、激運動、アルコールやカフェインが含まれている飲料の摂取を禁じた。

①降雨実験(RAIN)

事前に測定した最大酸素摂取量から算出した運動強度 $70\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する走運動を環境温5 °C、相対湿度50%に設定された人工気象室のトレッドミル上で行った。運動中は被験者の前方1.5m、高さ2.2mに設置された5個のノズルから水

を噴出させ、各被験者の走速度に等しい向かい風(186 ± 16 m/min)を被験者の前方より当てた。そのため、運動中、人工気象室内の相対湿度は 80~90%となった。降雨量は 40mm/h に設定した。

②対照実験(CON)

事前に測定した最大酸素摂取量から算出した運動強度 $70\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する走運動を環境温 5 °C、相対湿度 50%に設定された人工気象室のトレッドミル上で行った。運動中は各被験者の走速度に等しい向かい風を被験者の前方より当てた。

被験者はポリエステル 100%の長袖シャツとランニングパンツに着替え、カニューレを前腕表在静脈に挿入した後、食道温センサー(センサーテクニカ)、皮膚温センサー(センサーテクニカ)、心電図モニタ用電極の装着を行い、30 分間の座位安静とした。その後、ベンチコートを着用し、環境温 5°Cに設定された気象室に入室し、呼気ガス分析用マスク(HANS RUDOLPH)を装着した状態で 10 分間の座位安静後、30 分間の実験運動を開始した。Fig.1 に実験プロトコル概念図を示した。Fig.2 に人工気象室内部と実験運動の概念図および実験時の様子(RAIN)を示した。

3. 分析

食道温は食道温センサー(センサーテクニカ)にキシロカインゼリー(アセトゼネカ)を塗布し、鼻腔より 45cm 挿入し測定した。皮膚温は上腕部、胸部、大腿部、下腿部に皮膚温センサー(センサーテクニカ)を固定し、平均皮膚温は Ramanathan 法(58)で求めた。また、ふるえの有無を人工気象室入室後、10 分毎に申告させた。呼気ガスは自動呼気ガス分析装置(AE300S、ミナト医科学)を用いて分析した。心拍数は胸部双極誘導によって得られた心電図をベッドサイドモニター(QI-236P、日

本光電工業)によって 30 秒毎に記録した。RPE(6)は運動開始から 10 分毎に申告させた。

採血は、予め前腕の表在静脈にカニューレ(22 ゲージ、TERUMO)を留置し、生理食塩水とヘパリンで処理した三方活栓を介しておこなった。人工気象室外安静時、人工気象室内運動前、運動 10 分目、20 分目、30 分目に採血を行い、1 回の採血量は 10ml とした。血漿乳酸濃度と血漿グルコース濃度は EDTA-2Na 入りの採血管(TERUMO)に血液 4ml を採り攪拌し、その後、冷却遠心(4°C、3000 回転、15 分間)により血漿を分離し、乳酸・グルコース分析器(YSI2300PLUS、YSI)を用いて分析した。血漿エピネフリン濃度と血漿ノルエピネフリン濃度は EDTA-2Na 入りの採血管(TERUMO)に血液 4ml を採り攪拌し、その後、冷却遠心(4°C、3000 回転、15 分間)により血漿を分離し、HPLC 法(L-6200、日立製作所)を用い、検出器(FP-1520S、日本分光)で分析した。血清中性脂肪濃度、血清遊離脂肪酸濃度は血清分離剤と凝固促進フィルム入り採血管(TERUMO)に血液 4ml を採り、30 分間、室温で放置後、常温遠心(3000 回転、20 分間)により血清を分離し、生化学自動分析装置(7600-01、日立製作所)を用いて分析した。

測定項目

測定項目は食道温、皮膚温、酸素摂取量、呼吸交換比、心拍数、RPE、血漿乳酸濃度、血漿グルコース濃度、血漿エピネフリン濃度、血漿ノルエピネフリン濃度、血清中性脂肪濃度、血清遊離脂肪酸濃度であった。

統計処理

本研究の全データは平均値±SD で表した。統計処理ソフト(SPSS for Windows Ver. 10.0J)を用いて反復のある二元配置の分散分析(実験の種類×時間)を行い、条

件間の差の検定を行った。主効果あるいは交互作用があった場合には Fisher の LSD 法を用いて多重比較を行った。有意水準は危険率 5%未満とした。

第 3 節 結果

酸素摂取量の経時的変化を Fig.3 に示した。酸素摂取量は両条件共に運動開始から上昇し、運動 5 分目から 30 分目まで RAIN が CON と比較して有意に高い値を示した($p < 0.05$)。心拍数(Fig.4)、RPE(Fig.5)、呼吸交換比(RER)(Fig.6)は条件間に有意な差はなかった。食道温の経時的変化を Fig.7 に示した。RAIN の食道温は運動開始から運動 5 分目までに約 0.6 °C の低下を示した後、上昇した。食道温は運動 5 分目から 15 分目まで RAIN が CON と比較して有意に低い値を示した($p < 0.05$)。平均皮膚温の経時的変化を Fig.8 に示した。RAIN の平均皮膚温は運動 15 分目から 30 分目まで CON と比較して有意に低い値を示した($p < 0.05$)。血漿乳酸濃度、血漿グルコース濃度、血漿ノルエピネフリン濃度、血漿エピネフリン濃度、血清中性脂肪濃度、血清遊離脂肪酸濃度の変化を Table 1 に示した。RAIN の血漿乳酸濃度は運動中、CON と比較して有意に高い値を示した($p < 0.05$)。RAIN の血漿ノルエピネフリンは CON と比較して運動 10~20 分目まで有意に高い値を示した($p < 0.05$)。血漿グルコース濃度、血漿エピネフリン濃度、血清中性脂肪濃度、血清遊離脂肪酸濃度は条件間に有意な差はなかった。

第 4 節 考察

本研究は降雨環境を模擬し、降雨が寒冷環境下で走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に及ぼす影響を明らかにすることを目的として行った。その結果、寒冷環境下の降雨は食道温の低下、酸素摂取量の増加、血漿乳酸濃度及び血漿ノルエピネフリン濃度の上昇を引き起こすことが明らかとなり、運動パフォーマンス低下を引

き起こす可能性が考えられる。

エネルギー消費量

酸素摂取量はエネルギー消費量を反映しているため、本研究の結果から、降雨によって走運動中のエネルギー消費量が増大したと言える。この結果は、降雨環境を模擬し、歩行運動を行わせた Thompson ら(70)の報告と一致するものであった。本研究の酸素摂取量の増加には2つの要因が考えられる。1つ目は、非ふるえ熱産生の亢進である。ヒトは低温環境に暴露され、皮膚血管収縮による体温調節反応だけで深部体温を保持できなくなると、ふるえ熱産生(66)と主に褐色脂肪細胞や肝臓における熱産生を促進する非ふるえ熱産生との両者が起こり熱産生を亢進する(32)。Craig & Dvorak (12)と Doubt & Hsieh (17)は、ふるえの無い状態でも、酸素摂取量が増加することを報告している。本研究では10分毎にふるえの有無を被験者に申告させたが、安静時及び運動時のいずれも、ふるえの申告はなかった。このことから、本研究では非ふるえ熱産生による熱産生量の増加によって RAIN の酸素摂取量は増加したと考えられる。2つ目は筋温低下を原因とする、単位断面積あたりの筋収縮力の低下である。Blomstrand ら(5)は、筋温低下によって単位面積あたりの筋収縮力が低下すると、その低下を補償するために動員する運動単位数を増加させ、筋出力を維持し、その結果、酸素摂取量が増加することを報告している。また Faulkner ら(20)は筋冷却によって筋出力が低下すると、Type II 線維の動員数が増加し、血漿乳酸濃度が上昇することを報告している。このことから本研究の酸素摂取量と血漿乳酸濃度の上昇には筋温低下による筋出力の低下によって、運動単位の動員数が増加することが関与する。その結果、RAIN が CON と比較して有意に高い値を示したと考えられる。

体温反応

本研究における RAIN の食道温は運動開始から 5 分間で約 0.6°C の低下を示し、運動 5 分目、10 分目、15 分目において CON と比較して有意に低い値を示した。食道温の低下には 2 つの要因が考えられる。1 つ目は体熱放散量の増加である。Weller ら(77)は環境温 5 °C の寒冷環境下で衣服が濡れた状態であっても 60% $\dot{V}O_{2max}$ の運動を行うと、熱産生量が増加し、核心温は上昇することを報告している。本研究は 70% $\dot{V}O_{2max}$ の高強度運動(16)を設定したが、運動開始直後は体熱産生量が低く、さらには降雨が全身の皮膚表面と衣服を濡らすため熱放散量が熱産生量を一時的に上回ったと考えられる。そしてその後は、運動の進展に伴って、熱産生量が増加し、運動開始 5 分目以降は上昇に転じたと考えられる。またノルエピネフリンは寒冷暴露により交感神経系が興奮し、主に交感神経終末から分泌される(3,35)。ノルエピネフリンの分泌によって代謝が亢進し、その結果、熱産生量が増加することが知られている (12,17)。本研究における RAIN の血漿ノルエピネフリン濃度は運動 10 分目、20 分目に CON と比較して有意に高い値を示したが、運動 30 分目に、その差はなかった。これは本研究の食道温の変化でも同様であり、運動 5 分目以降は両条件ともに上昇し、運動 25 分目以降には条件間の差は殆ど見られなかった。降雨による寒冷ストレスは運動継続に伴う熱産生量の増加によって軽減され、その結果、運動 30 分目の血漿ノルエピネフリン濃度には条件間の差がなくなつたと考えられる。

運動開始時のヒトの深部体温には上昇に先行した一過性の下降(initial fall)がしばしば観察される(31)。皮膚血管内で冷却された血液が運動によって核心部へ移動することによって一時的に核心温が低下する。本研究は運動開始直前まで両条件共に降雨のない状態でベンチコートを着用し安静としていたため、平均皮膚温に条件間の有意な差はなかったが、RAIN は運動開始直後から全身に降雨を受けたため、

皮膚血管内で冷却された血液が体中心部に移動し、その結果、Initial fall が強く発現したと考えられる。

これらのことから、寒冷環境における降雨は特に蓄熱量と産熱量の小さい運動開始時に体温低下を引き起こし、また運動中のエネルギー消費量や血漿乳酸濃度の上昇の原因となることから、運動パフォーマンスの低下を引き起こすと考えられる。そのため、降雨をともなう寒冷環境では降雨の無い環境と比較して、更なる防寒や、入念なウォーミングアップの実施等の対策が必要と考えられる。

第5節 まとめ

寒冷環境下における降雨は、走運動中のヒトのエネルギー消費量の増加、血漿乳酸濃度の上昇、食道温の低下を起こすことが明らかとなった。その原因として、降雨によって熱放散量が増加し、非ふるえ熱産生が増加すること、また筋温の低下によって生じる筋出力の低下を代償するため動員される運動単位数が増加することが考えられる。寒冷環境における降雨は運動パフォーマンスの低下を起こす可能性が考えられる。

第3章

暑熱環境下における降雨が走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に及ぼす影響

第1節 目的

第2節 方法

第3節 結果

第4節 考察

第5節 まとめ

第1節 目的

本研究の目的は、降雨が暑熱環境下(33°C)で走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に及ぼす生理的影響を明らかにすることとした。

第2節 方法

1. 被験者

被験者は定期的に運動を行っている健康な成人男性 8 名で、年齢、身長、体重、最大酸素摂取量の平均値±標準偏差(SD)は、それぞれ 22.1 ± 3.0 歳、 174.3 ± 6.9 cm、 67.4 ± 6.4 kg、 55.5 ± 6.4 ml·kg⁻¹·min⁻¹であった。被験者にはあらかじめ実験の趣旨を説明した上で、実験参加についての同意を得た。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て実施した。

2. 実験のプロトコル

実験に先立って、トレッドミル(BM-200、S&ME)にて 2 分毎に分速 20m ずつ負荷を漸増し、疲労困憊に至るプロトコルにて最大酸素摂取量を 20°Cの実験室において測定した。主実験は以下に示す 2 条件でそれぞれ別の日に無作為の順序で行った。なお、本実験は環境温度、湿度のコントロールに加えて、降雨と風を模擬できる人工気象室(TBR-12A4PX、ESPEC)で行った。各実験は1週間の間隔を空け、同じ時間帯に行った。被験者には実験前日の夕食以降の絶食を指示し、激運動、アルコールやカフェインが含まれている飲料の摂取を禁じた。

①降雨実験(RAIN)

事前に測定した最大酸素摂取量から算出した運動強度 $70\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する走運動を環境温 33 °C、相対湿度 50%に設定された人工気象室のトレッドミル上で行った。運動中は被験者の前方 1.5m、高さ 2.2m に設置された 5 個のノズルから水

を噴出させ、各被験者の走速度に等しい向かい風(189±11 m/min)を被験者の前方より当てた。そのため、運動中、人工気象室内の相対湿度は 80～90%となった。降雨量は 30mm/h に設定した。

②対照実験(CON)

事前に測定した最大酸素摂取量から算出した運動強度 $70\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する走運動を環境温 33℃、相対湿度 50%に設定された人工気象室のトレッドミル上で行った。運動中は各被験者の走速度に等しい向かい風を被験者の前方より当てた。

被験者はポリエステル 100%の半袖シャツとランニングパンツに着替え、カニューレを前腕表在静脈に挿入した後、食道温センサー(センサーテクニカ)、皮膚温センサー(センサーテクニカ)、心電図モニタ用電極の装着を行い、30 分間の座位安静とした。その後、環境温 33℃に設定された気象室に入室し、呼気ガス分析用マスク(HANS RUDOLPH)を装着した状態で 10 分間の座位安静後、30 分間の実験運動を開始した。Fig.9 に実験プロトコル概念図を示した。

3. 分析

第 2 章と同じ。

測定項目

第 2 章と同じ。

統計処理

第 2 章と同じ。

第3節 結果

食道温の経時的変化を Fig.10 に示した。食道温は運動開始 5 分目から 30 分目まで RAIN が CON と比較して有意に低い値を示した($p < 0.05$)。平均皮膚温の経時的変化を Fig.11 に示した。RAIN の平均皮膚温は運動 5 分目から 30 分目まで CON と比較して有意に低い値を示した($p < 0.05$)。全身発汗量は RAIN が CON と比較して有意に低い値を示した(CON; $1101 \pm 203\text{g}$ 、RAIN; $712 \pm 183\text{g}$ 、 $p < 0.05$)。酸素摂取量は条件間に有意な差はなかった(Fig.12)。しかしながら、心拍数は運動 20 分目から 30 分目まで RAIN が CON と比較して有意に低い値をしめした($p < 0.05$)(Fig.13)。RPE(Fig.14)、呼吸交換比(RER)(Fig.15)の値に条件間の有意な差はなかった。血漿乳酸濃度、血漿グルコース濃度、血漿ノルエピネフリン濃度、血漿エピネフリン濃度、血清中性脂肪濃度、血清遊離脂肪酸濃度の変化を Table 2 に示した。血漿乳酸濃度は運動 30 分目に RAIN が CON と比較して有意に低い値を示した($p < 0.05$)。血漿エピネフリン濃度は運動 30 分目に RAIN が CON と比較して有意に低い値を示した($p < 0.05$)。血漿グルコース濃度、血漿ノルエピネフリン濃度、血清中性脂肪濃度、血清遊離脂肪酸濃度は条件間に有意な差はなかった。

第4節 考察

本研究は降雨環境を模擬し、降雨が暑熱環境下で走運動中のヒトの体温・エネルギー代謝に及ぼす影響を明らかにすることを目的として行った。その結果、暑熱環境下の降雨は食道温、心拍数、血漿乳酸濃度、血漿エピネフリン濃度の低下を引き起こすことが明らかとなり、体温上昇を原因とした運動パフォーマンスの低下を軽減する可能性が考えられる。

体温反応

本研究における RAIN の食道温は運動開始から 5 分間で約 0.5 °C の一時的な低下を示し、その後は運動終了時まで上昇した。RAIN の食道温は運動 5 分目から 30 分目まで CON と比較して有意に低い値を示した。Adams ら(1)は暑熱環境下で中強度の運動中(自転車エルゴメーター)のヒトに 180m/s の風を当てると、無風状態と比較して熱放散が約 50W/m² 増加すると報告している。本研究は RAIN と CON の両条件に Adams ら(1)と同程度の走速度分の向かい風(189 ± 11m/min)を当てているが、RAIN はそれに加えて全身が降雨で濡れているため皮膚表面と衣服に風が当たることで、伝導・対流・蒸発による熱放散が促進されたと考えられる。加えて、運動開始初期では熱産生量と蓄熱量が低いため、熱放散量が体熱産生量を上回り、一時的に核心温が低下したと考えられる。また本研究の RAIN の発汗量は CON と比較して有意に低い値を示した。運動時及び安静時に皮膚表面を水で濡らすと、発汗量が抑制されることが報告されている(7,49)。これは皮膚表面で水が蒸発し、気化熱を奪う(蒸発性熱放散)ことにより、核心温が低下するあるいは上昇が抑制されることが原因として考えられる。そのため暑熱下の降雨環境では皮膚上の雨(水滴)が熱放散を促進し、体温上昇を抑制する結果、発汗量は減少すると考えられる。

本研究の血漿乳酸濃度と血漿エピネフリン濃度は運動 30 分目に RAIN が CON と比較して有意に低い値を示した。乳酸は解糖系においてグリコーゲンが代謝・分解されることで産生されるが(36)、暑熱環境下では運動によって血中乳酸濃度の上昇が亢進すると報告されており(14,44)、その原因としてエピネフリン濃度の上昇が筋内の糖代謝を促進することが挙げられている(29)。加えて、暑熱環境下では、皮膚血流量の増加によって肝血流量が減少し、肝臓での乳酸の取り込みが減少すること、また筋血流量も減少することで無機代謝への依存が高まることが報告されている(11,23,59)。本研究では降雨で全身が濡れたことで熱ストレスを原因とする

エピネフリン分泌が減少したこと、さらに皮膚血流量の増加が抑制されることで、肝臓や筋への血液分配が増加し、その結果、血漿乳酸濃度が低下したと考えられる。しかしながら、エネルギー基質として燃焼した糖質と脂質の割合を示す RER の値は、本研究の安静時と運動時を通じて有意な差はなかった。その原因として、実験運動を $70\% \dot{V}O_{2\max}$ 相当の走運動という高い運動強度に設定したため、被験者の中には RER の値が 1.0 を超える者もあり、RER は代謝性アシドーシスに対する呼吸性代償(過換気)の影響を受け、エネルギー基質の割合を反映しなかったと推測される。筋内の基質代謝についての検討は今後の課題である。

呼吸循環反応

酸素摂取量はエネルギー消費量を反映するため、本研究の RAIN と CON とでは、そのエネルギー消費量に差はなかったと考えられる。また、一般的に酸素摂取量と心拍数には高い相関関係がある (47)。しかしながら本研究においては、酸素摂取量に差が無かったにも関わらず、RAIN の心拍数は CON と比較して有意に低い値を示した。ヒトは暑熱環境下では皮膚血管拡張によって皮膚への血流量を増やし、熱放散量を増加させる。そのために生じる静脈還流量(中心血液量)の減少に伴って 1 回拍出量が減少し、その結果、心拍出量を維持するために心拍数の増加が起きる (13,78)。また一方で、身体冷却によって皮膚血管拡張を軽減し、静脈還流量を増加させることで心拍数の増加を抑制できることが報告されている(60)。本研究における運動中の RAIN の平均皮膚温は、CON と比較して有意に低い値を示したことから、皮膚血管拡張が軽減されることで心拍数の上昇が抑制されたと考えられる。また血液中のエピネフリンは主に副腎髄質から分泌され交感神経系の効果を増幅、持続させる作用を持ち、心拍数の増加、心筋の収縮力を上げる働きがある(41a)。運動によって副腎髄質からのエピネフリン分泌は増加するが(41a)、熱ストレスに

よって、さらに増加することが報告されている(21,29)。本研究における、RAINの心拍数の低下には、皮膚血管拡張反応の軽減と血漿エピネフリン濃度上昇の抑制との2つの要因が関与すると推察される。

これらのことから、暑熱環境における降雨は核心温の上昇、心拍数や血漿乳酸濃度の上昇を抑制することから、高体温や熱ストレスを原因とする運動パフォーマンスの低下を抑制すると考えられる。そのため、降雨をともなう暑熱環境下では降雨の無い環境と比較して、トレーニングや試合中の運動強度を上げて実施することが可能になると考えられる。

第5節 まとめ

暑熱環境下における降雨は、走運動中のヒトの食道温、心拍数、血漿乳酸濃度、血漿エピネフリン濃度を低下させることが明らかとなった。その原因として、降雨によって熱放散量が増加し、熱ストレスが軽減されることが考えられる。このことから暑熱環境下における降雨は運動パフォーマンスの低下を軽減すると考えられる。

第4章

総括

第1節 本研究のまとめ

第2節 結論

第1節 本研究のまとめ

本研究では、降雨環境が運動中のヒトに及ぼす生理的影響について検討を行うため、第2章では降雨をともなった寒冷環境、第3章では降雨をともなった暑熱環境を設定して実験を行った。また実験運動に $70\% \dot{V}O_{2max}$ の高強度運動を採用したことで、これまで実験運動が低～中強度運動に限られてきたこの分野に新たな知見を加えた。

1. 寒冷環境下($5^{\circ}C$)における降雨が走運動($70\% \dot{V}O_{2max}$)中のヒトに与える生理的影響として、エネルギー消費量の増加、食道温の低下、血漿ノルエピネフリン濃度と血漿乳酸濃度の上昇が明らかとなった。皮膚表面及び着衣が濡れることで熱放散量が増加することを原因とする身体冷却がその原因として考えられる。

2. 暑熱環境($33^{\circ}C$)における降雨が走運動($70\% \dot{V}O_{2max}$)中のヒトに与える生理的影響として、食道温の低下、発汗量の減少、心拍数の低下、血漿エピネフリン濃度と血漿乳酸濃度の低下が明らかとなった。皮膚表面及び着衣が濡れることで熱放散量が増加し、運動中の暑熱ストレスが軽減されたことがその原因として考えられる。

本研究で得られた結果を実際の運動・スポーツの場面に応用すると、降雨をともなった寒冷環境下で運動を実施する際は、運動開始直後は特に寒冷ストレスが強くなることから、運動前のウォーミングアップを十分に行い、筋温や体温を上げておくことが必要となる。また降雨で濡れることによって身体冷却が更に進むことが考えられるため、降雨環境ではより一層の防寒対策が必要となる。一方、

降雨をともなった暑熱環境下では、雨で身体が濡れることで、暑熱ストレスが軽減される。このことから、一般的に運動強度や運動時間を抑えざるを得ない暑熱環境であっても、トレーニングや試合中の運動強度を上げて実施できると考えられる。

第2節 結論

1. 寒冷環境下における降雨は、走運動中のヒトに対し、身体冷却を原因としたエネルギー消費量の増加や血中乳酸濃度の上昇を引き起こすことから、運動パフォーマンスの低下を招く可能性がある。
2. 暑熱環境下における降雨は、走運動中のヒトに対し、核心温の上昇を抑制し、心拍数の低下、発汗量の減少、血漿乳酸濃度の低下を引き起こすことから、暑熱ストレスを原因とした運動パフォーマンスの低下を抑制する可能性がある。

本研究は実験運動を30分間と比較的短時間に設定しておこなった。また、運動種目によっては着衣条件や運動強度も異なってくる。更に、本研究は走速度分の向かい風を設定したが、これは無風状態での運動を意味する。多様な降雨環境の影響を明らかにするには、今後は運動強度、運動時間、着衣を変えた検討を行う必要がある。

図表

環境温; 5°C
相对湿度; CON 50%, RAIN 50% → 80~90%

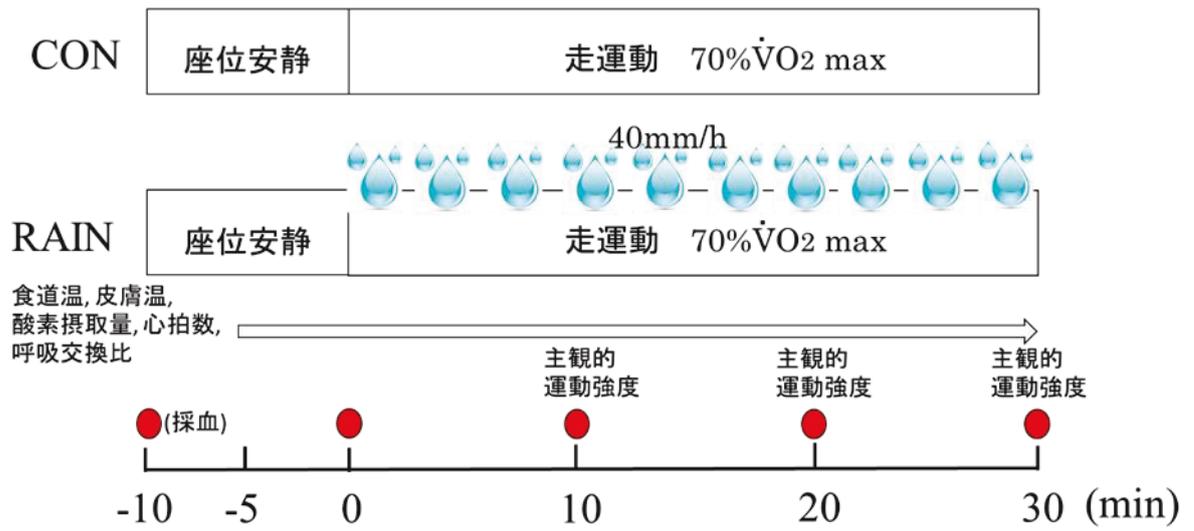


Fig.1 実験プロトコル概念図

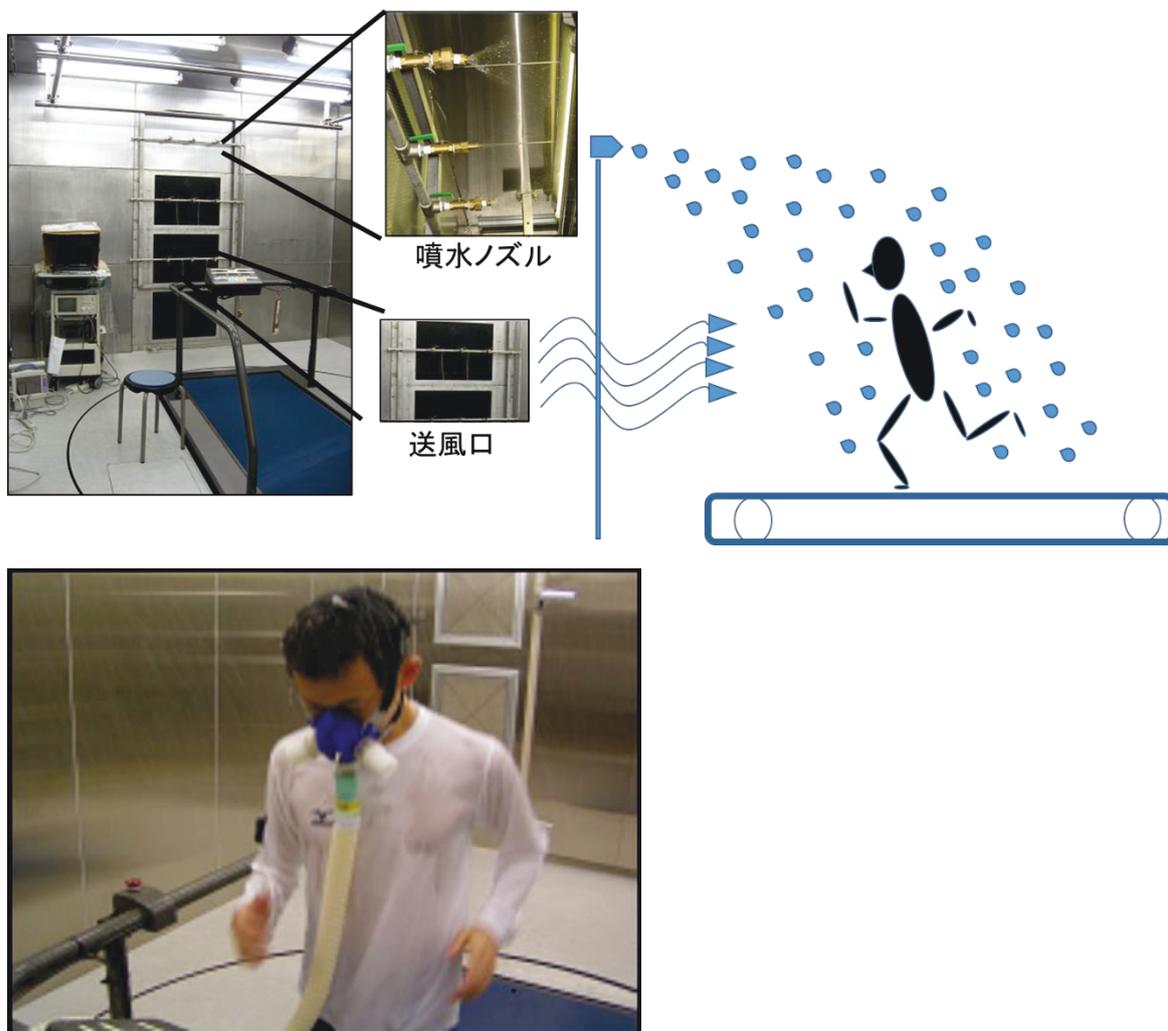


Fig.2 人工気象室内部と実験運動の概念図および実験時の様子(RAIN)

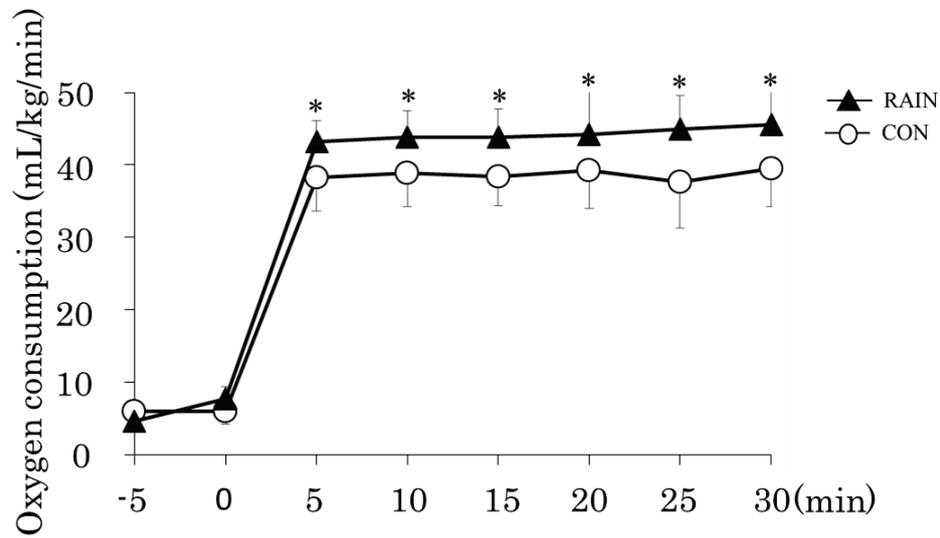


Fig.3 Oxygen consumption (mL/kg/min) during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (40mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=7). *Significantly different from control (p<0.05).

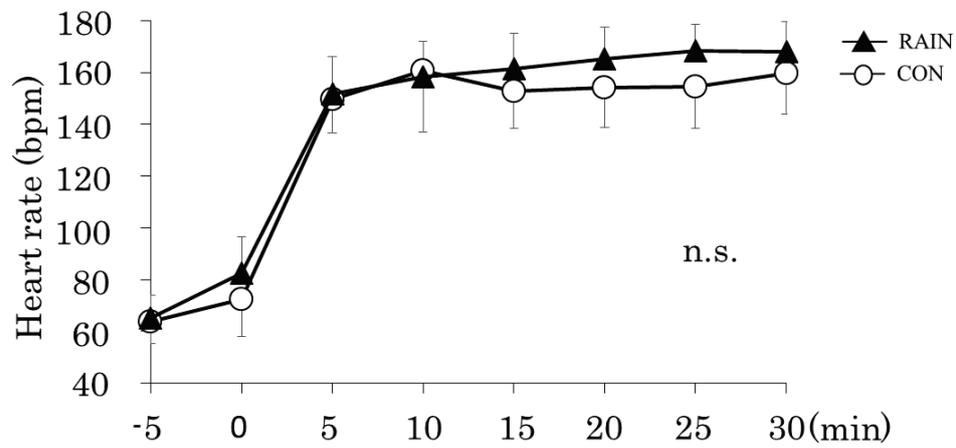


Fig.4 HR (bpm) during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (40mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=7).

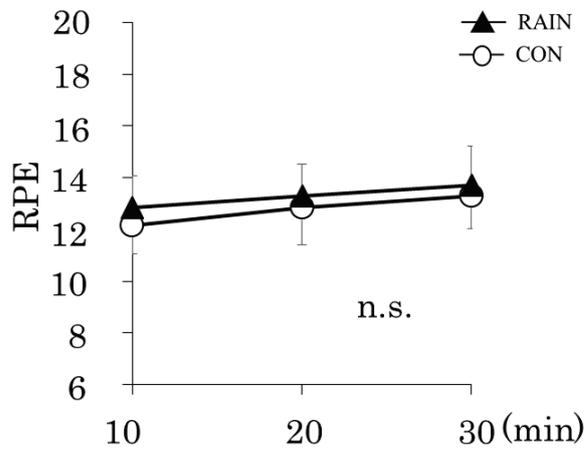


Fig.5 RPE (rating of perceived exertion) while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (40mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=7).

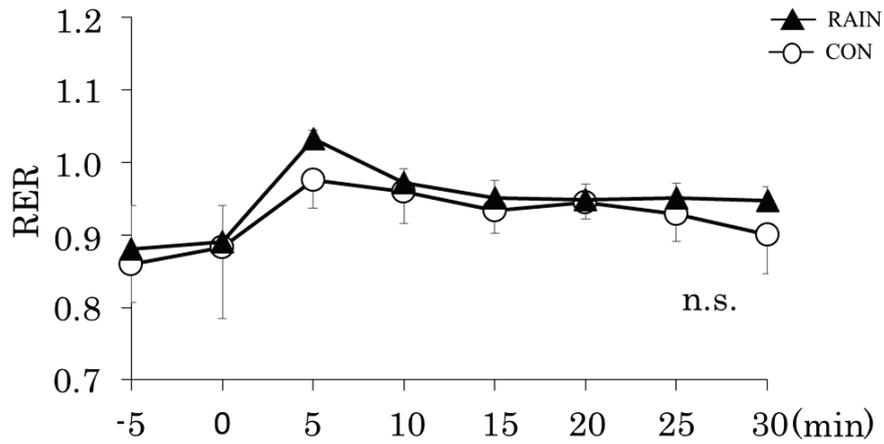


Fig.6 RER (respiratory exchange ratio) during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V} O_{2max}$ in RAIN (40mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=7).

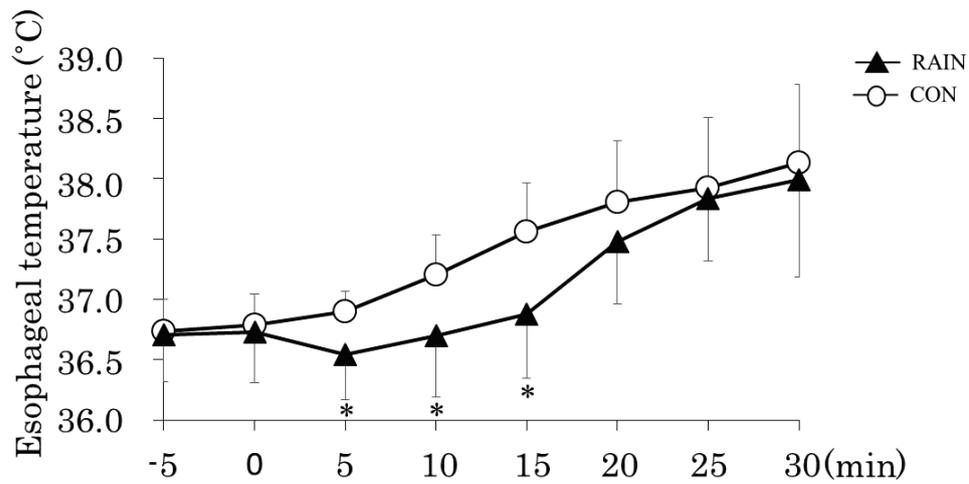


Fig.7 Esophageal temperature during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_2$ max in RAIN (40mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=7). *Significantly different from control (p<0.05).

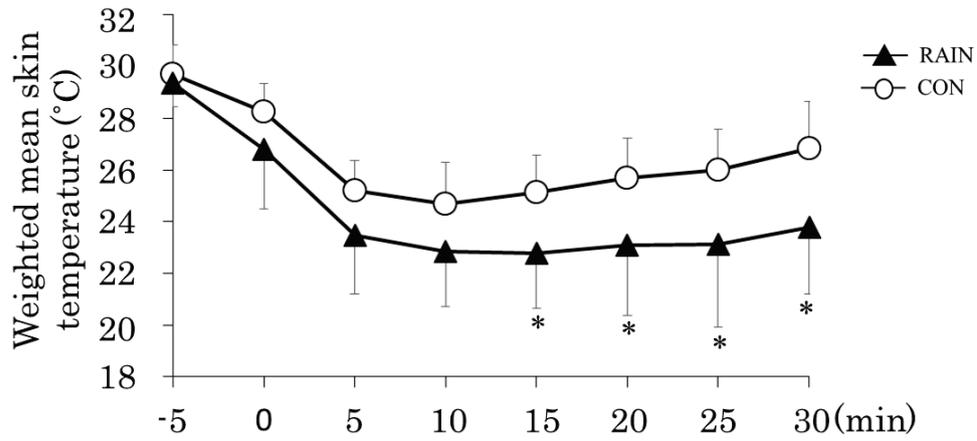


Fig.8 Weighted mean skin temperature during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (40mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=7). *Significantly different from control (p<0.05).

環境温; 33°C
相对湿度; CON 50%, RAIN 50% → 80~90%

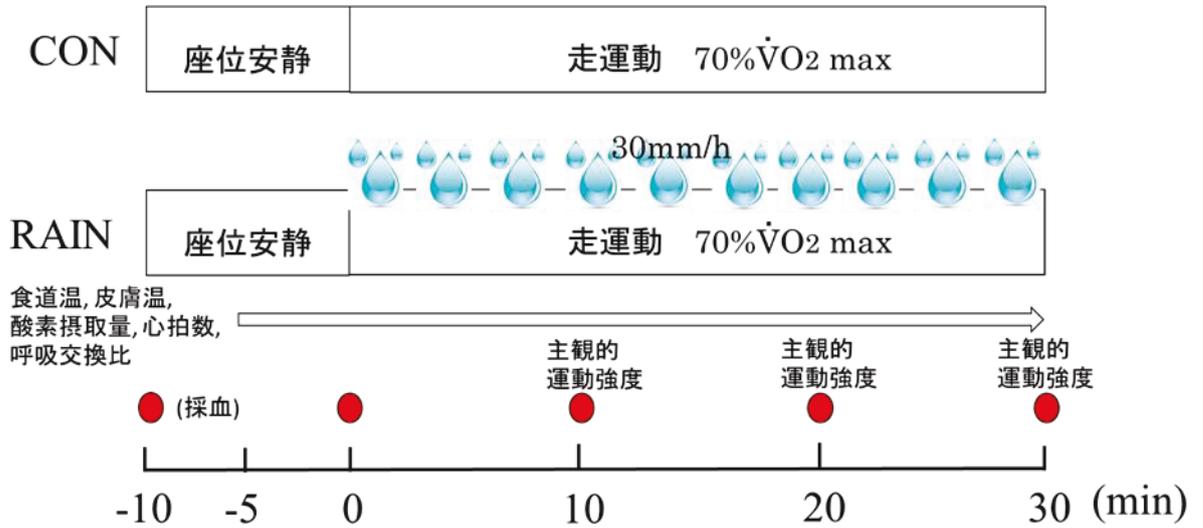


Fig.9 実験プロトコル概念図

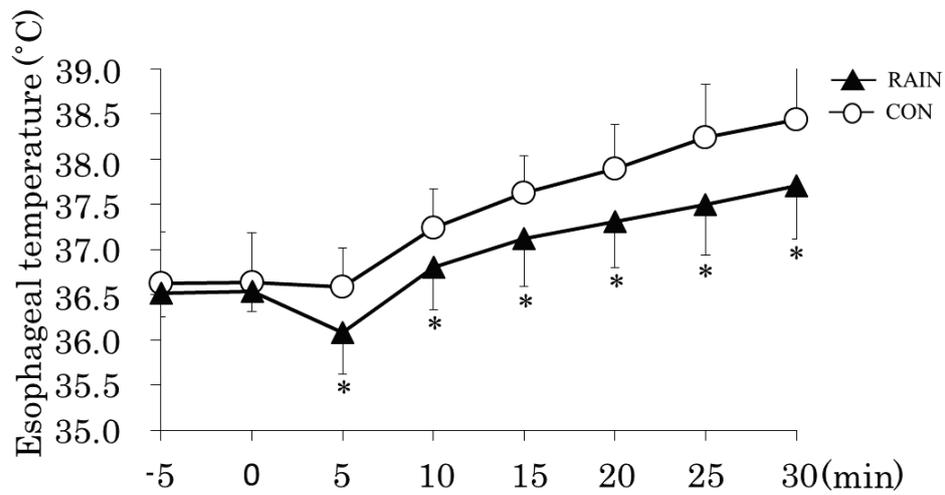


Fig.10 Esophageal temperature during rest and while running for 30 min at $70\% \dot{V}O_{2\max}$ in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 33 °C. Values are means \pm SD (n=11). *Significantly different from control (p<0.05).

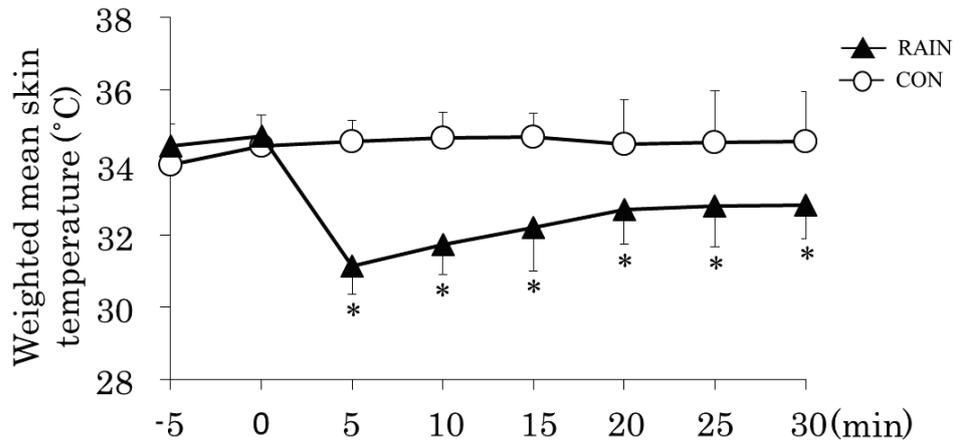


Fig.11 Weighted mean skin temperature during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 33 °C. Values are means \pm SD (n=11). *Significantly different from control (p<0.05).

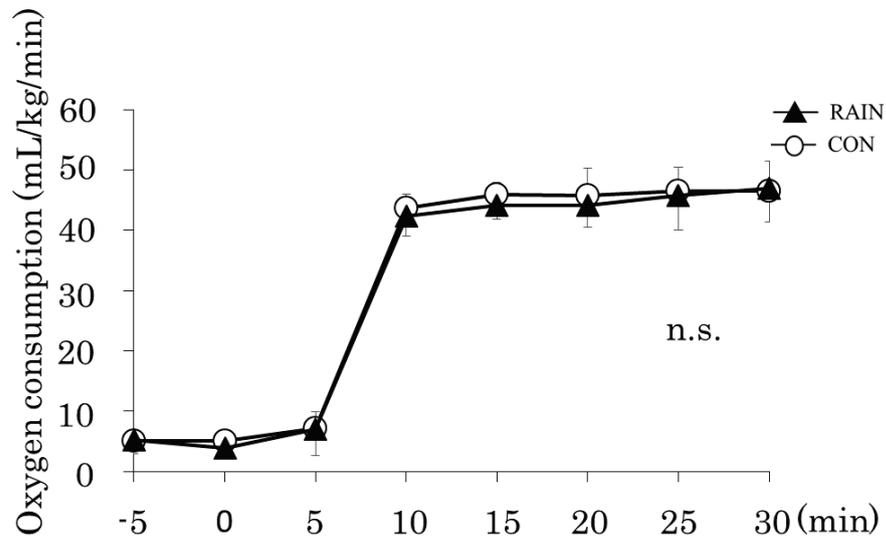


Fig.12 Oxygen consumption during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 33 °C. Values are means \pm SD (n=11).

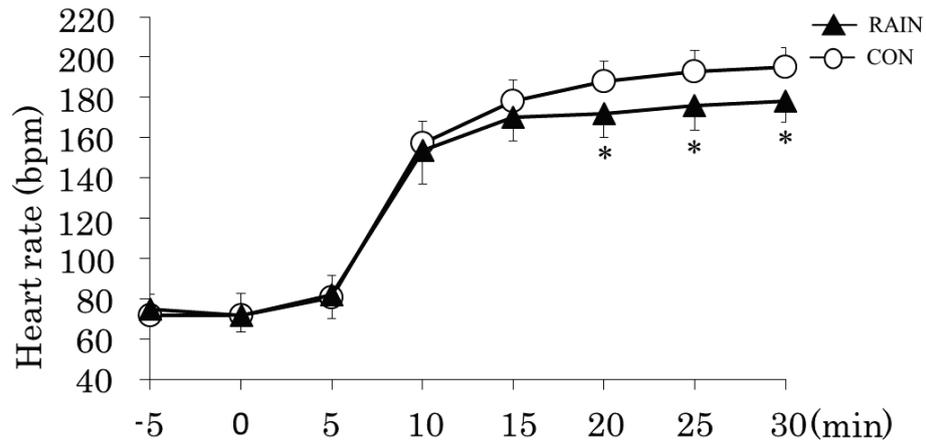


Fig.13 HR during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 33 °C. Values are means \pm SD (n=11). *Significantly different from control (p<0.05).

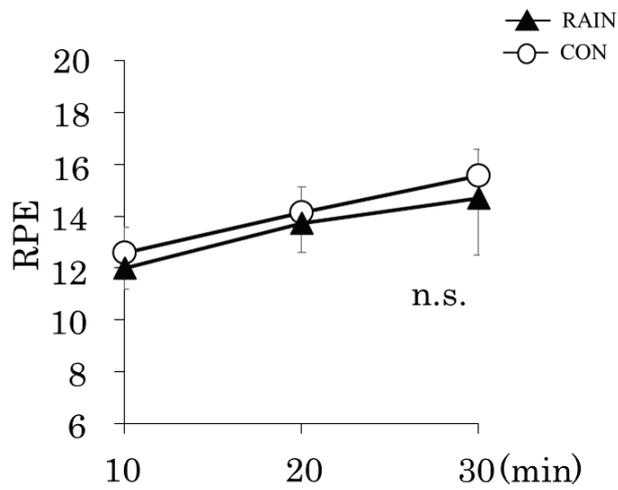


Fig.14 RPE (rating of perceived exertion) while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=11).

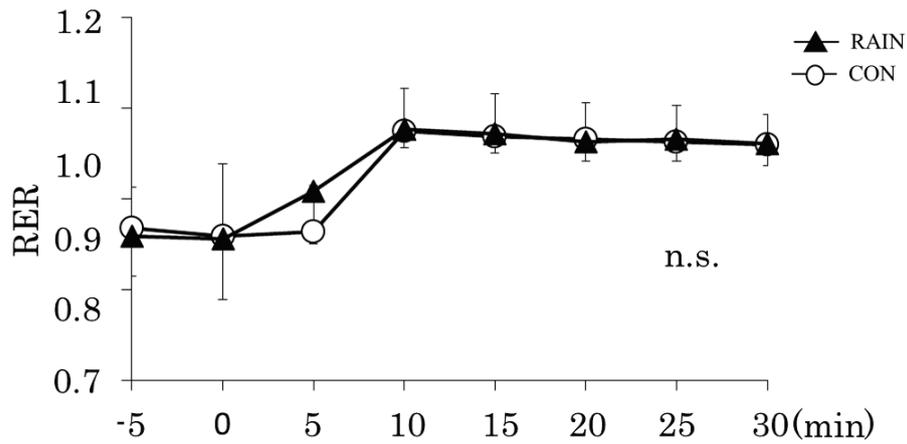


Fig.15 RER (respiratory exchange ratio) during rest and while running for 30 min at 70% $\dot{V}O_{2max}$ in RAIN (30mm/h of precipitation) and CON (without precipitation) at 5 °C. Values are means \pm SD (n=11).

Table 1 Plasma lactate, glucose, norepinephrine, epinephrine, serum triglyceride and FFA concentrations at rest and during 30 min of exercise.

	Condition	Exercise duration (min)				
		Rest	Rest (cold)	10	20	30
Lactate (mmol/L)	RAIN	1.22 ± 0.34	1.56 ± 0.40	6.51 ± 1.19*	5.72 ± 0.62*	4.44 ± 1.13*
	CON	1.42 ± 0.39	1.72 ± 0.33	4.48 ± 0.47	3.65 ± 1.08	3.02 ± 0.79
Glucose (mg/dL)	RAIN	97.4 ± 8.5	94.5 ± 9.3	101.4 ± 15.6	105.1 ± 16.4	108.4 ± 16.3
	CON	94.4 ± 7.0	96.2 ± 7.9	99.0 ± 12.9	95.5 ± 13.1	106.7 ± 13.9
Norepinephrine (pg/mL)	RAIN	180.6 ± 54.2	564.7 ± 173.3	2905.6 ± 951.3*	2288.1 ± 640.7*	1754.3 ± 886.1
	CON	185.7 ± 102.9	557.3 ± 231.8	1942.6 ± 798.3	1423.4 ± 542.9	1355.4 ± 623.1
Epinephrine (pg/mL)	RAIN	47.4 ± 29.0	44.7 ± 20.0	172.0 ± 70.3	207.1 ± 100.7	172.7 ± 97.7
	CON	45.0 ± 18.4	50.3 ± 30.1	115.9 ± 58.9	149.4 ± 85.1	128.4 ± 68.8
TG (mg/dL)	RAIN	65.7 ± 23.5	62.9 ± 23.5	77.3 ± 36.0	74.0 ± 36.5	74.0 ± 33.0
	CON	55.2 ± 17.0	52.5 ± 15.7	51.7 ± 15.7	54.2 ± 18.6	51.5 ± 17.9
FFA (mg/dL)	RAIN	0.31 ± 0.25	0.44 ± 0.23	0.36 ± 0.14	0.41 ± 0.20	0.64 ± 0.25
	CON	0.42 ± 0.18	0.59 ± 0.26	0.52 ± 0.14	0.51 ± 0.19	0.71 ± 0.24

RAIN, 40mm/h of precipitation; CON; control without precipitation. Values are means ± SD (n=7). *Significantly different from control (p<0.05).

Table 2 Plasma lactate, glucose, epinephrine, norepinephrine, serum triglyceride and FFA concentrations at rest and during 30 min of exercise.

	Condition	Exercise duration (min)				
		Rest	Rest (33°C)	10	20	30
Lactate (mmol/L)	RAIN	1.26 ± 0.30	1.11 ± 0.19	4.05 ± 1.40	4.57 ± 1.94	4.95 ± 2.54*
	CON	1.51 ± 0.41	1.20 ± 0.32	4.48 ± 1.68	5.49 ± 2.91	6.96 ± 3.29
Glucose (mg/dL)	RAIN	90.7 ± 4.3	91.5 ± 3.9	89.1 ± 5.1	102.7 ± 13.5	123.4 ± 38.1
	CON	87.0 ± 7.7	92.8 ± 11.0	93.1 ± 19.1	93.2 ± 20.0	125.9 ± 34.3
Epinephrine (pg/mL)	RAIN	57.8 ± 18.1	89.14 ± 28.5	154.1 ± 89.2	238.1 ± 204.6	181.5 ± 111.6*
	CON	59.5 ± 32.9	86.0 ± 31.6	151.1 ± 42.4	289.8 ± 204.6	345.8 ± 306.8
Norepinephrine (pg/mL)	RAIN	302.2 ± 65.0	283.1 ± 45.8	1313.7 ± 479.0	2237.0 ± 1150.2	2113.1 ± 943.9
	CON	304.8 ± 91.8	317.7 ± 155.8	1225.7 ± 294.3	2276.8 ± 861.9	2451.1 ± 735.3
TG (mg/dL)	RAIN	62.0 ± 38.8	63.1 ± 44.0	64.7 ± 45.0	64.8 ± 44.1	58.8 ± 44.3
	CON	61.7 ± 38.5	61.3 ± 39.6	66.1 ± 40.8	67.5 ± 41.9	62.4 ± 38.7
FFA (mg/dL)	RAIN	0.44 ± 0.20	0.39 ± 0.22	0.42 ± 0.27	0.49 ± 0.34	0.71 ± 0.26
	CON	0.33 ± 0.26	0.36 ± 0.22	0.39 ± 0.24	0.42 ± 0.23	0.62 ± 0.37

RAIN, 30mm/h of precipitation; CON; control without precipitation. Values are means ± SD (n=11). *Significantly different from control (p<0.05).

参考文献

- 1) Adams WC, Mack GW, Langhans GW, Nadel ER. Effects of varied air velocity on sweating and evaporative rates during exercise. *J Appl Physiol* 1992; 73: 2668-2674.
- 2) Ainslie PN, Campbell IT, Frayn KN, Humphreys SM, Maclaren DP, Reilly T. Physiological and metabolic response to a hill walk. *J Appl Physiol* 2002; 92: 179-187.
- 3) Arnett EL, Watters DT. Catecholamine excretion in men exposed to cold. *J Appl Physiol* 1960; 15: 499-500.
- 4) Beelen A, Sargeant AJ. Effect of lowered muscle temperature on the physiological response to exercise in men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1991; 63: 387-392.
- 5) Blomstrand E, Kaijser L, Bergh U, Ekblom B. Temperature-induced changes in metabolic and hormonal responses to intensive dynamic exercise. *Acta Physiol Scand* 1986; 127: 477-484.
- 6) Borg GAV. Perceived exertion: a note on "history" and methods. *Med Sci Sports Exerc* 1973; 5: 90-93.
- 7) Brebner DF, Kerslake DM. The time course of the decline in sweating produced by wetting the skin. *J Physiol* 1964; 175: 295-302.
- 8) Cheung SS, McLellan TM. Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress. *J Appl Physiol* 1998; 84: 1731-1739.

- 9) Cheuvront SN, Carter R 3rd Sawka MN. Fluid balance and endurance exercise performance. *Curr Sports Med Rep* 2003; 2: 202-208.
- 10) Cheuvront SN, Haymes EM. Thermoregulation and marathon running: biological and environmental influences. *Sports Med* 2001; 31: 743-762.
- 11) Claremont AD, Nagle F, Reddan WD, Brooks GA. Comparison of metabolic, temperature, heart rate and ventilator responses to exercise at extreme ambient temperature (0 °C and 35 °C.). *Med Sci Sports* 1975; 7: 150-154.
- 12) Craig AB, Dvorak M. Thermal regulation of man exercising during water immersion. *J Appl Physiol* 1968; 25: 28-35.
- 13) Crandall CG, Wilson TE. Human cardiovascular responses to passive heat stress. *Compr Physiol* 2015; 5: 17-43.
- 14) Dimri GP, Malhotra MS, Sen Gupta J, Kumar TS, Arora BS. Alterations in aerobic-anaerobic proportions of metabolism during work in heat. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1980; 45: 43-50.
- 15) Dolny DG, Lemon PW. Effect of ambient temperature on protein breakdown during prolonged exercise. *J Appl Physiol* 1988; 64: 550-555.
- 16) Donnelly JE, Blair SN, Jakicic JM, Manore MM, Rankin JW, Smith BK, American College of Sports Medicine. American College of Sports Medicine Position Stand. Appropriate physical activity intervention strategies for weight loss and prevention of weight regain for adults. *Med Sci Sports Exerc* 2009; 41: 459-471.
- 17) Doubt TJ, Hsieh SS. Additive effects of caffeine and cold water during

submaximal leg exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 23: 435-442.

18) Ducharme MB, Tikuisis. In vivo thermal conductivity of the human forearm tissues. *J Appl Physiol* 1991; 70: 2682-2690.

19) Ely MR, Martin DE, Cheuvront SN, Montain SJ. Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Med Sci sports Exerc* 2008; 40: 1675-1680.

20) Faulkner JA, Zerba E, Brooks SV. Muscle temperature of mammals: cooling impairs most functional properties. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 1990; 259: R259-R265.

21) Febbraio, MA, Snow, RJ, Stathis, CG, Hargreaves, M, Stathis CG, Martin IL, Carey MF. Effect of heat stress on muscle energy metabolism during exercise. *J Appl Physiol* 1994; 77: 2827-2831.

22) Ferretti G. Cold and muscle performance. *Sports Med* 1992; 13: S185-S187.

23) Fink WJ, Costill DL, Van Handel PJ. Leg muscle metabolism during exercise in the heat and cold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1975; 34: 183-190.

24) Flouris AD, Westwood DA, Mekjavic IB, Cheung SS. Effect of body temperature on cold induced vasodilation. *Eur J Appl Physiol* 2008; 104: 491-499.

25) Fogelholm M. Effects of bodyweight reduction on sports performance. *Sports Med* 1994; 18: 249-267.

- 26) Galloway SD, Maughan RJ. Effects of temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 1997; 29: 1240-1249.
- 27) González-Alonso J, Mora-Rodríguez R, Below PR, Coyle EF. Dehydration markedly impairs cardiovascular function in hyperthermic endurance athletes during exercise. *J Appl Physiol* 1997; 82: 1229-1236.
- 28) Hargreaves M. Physiological limits to exercise performance in the heat. *J Sci Med Sport* 2007; 11: 66-71.
- 29) Hargreaves M, Angus D, Howlett K, Conus NM, Febbraio M. Effect of heat stress on glucose kinetic during exercise. *J Appl Physiol* 1996; 81: 1594-1597.
- 30) Haymes EM, Dickinson AL, Malville N, Ross RW. Effects of wind on the thermal and metabolic responses to exercise in the cold. *Med Sci Exerc* 1982; 14: 41-45.
- 31) Hong SI, Nadel ER. Thermogenic control during exercise in a cold environment. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1979; 47: 1084-1089.
- 32) 入來正躬: 体温調節のしくみ, 文光堂, 1995, 244-246.
- 33) Jacobs I, Romet TT, Frim J, Hvnes A. Effects of endurance fitness on responses to cold water immersion. *Aviat Space Environ Med* 1984; 55: 715-720.
- 34) Jacobs I, Romet TT, Kerrigan-Brown D. Muscle glycogen depletion during

exercise at 9°C and 21°C. *Eur J Appl Physiol* 1985; 54: 35-39.

35) Johnson DG, Haywarrrd JS, Jacobs TP, Collis ML, Eckerson JD, Williams RH. Plasma norepinephrine responses of man in cold water. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1977; 43: 216-220.

36) Karlsson J. Lactate and phosphagen concentrations in working muscle of man with special reference to oxygen deficit at the onset of work. *Acta Physiol Scand Suppl* 1971; 358: 1-72.

37) Kaufman WC, Bothe DJ. Wind chill reconsidered, Siple revisited. *Aviat Space Environ Med* 1986; 57: 23-26.

38) 北川薫: 運動とスポーツの生理学, 市村出版, 2001, 27-32.

39) Maw GJ, Boutcher SH, Taylor NA. Rateings of perceived exertion and affect in hot and cool environments. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1993; 67: 174-179.

40) McArdle WD, Katch FI, Katch VL. Exercise and Thermal stress. In: *EXERCISE PHYSIOLOGY Nutrition, Energy, and Human Performance* 2th, Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 1986, 452-463.

41) McArdle WD, Katch FI, Katch VL. Exercise and Thermal stress. In: *EXERCISE PHYSIOLOGY Nutrition, Energy, and Human Performance* 7th, Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2009, a) 400-443, b) 611-639.

42) McArdle WD, Magel JR, Lesmes GR, Pechar GS. Metabolic and cardiovascular adjustment to work in air and water at 18, 25, and 33 °C. *J Appl Physiol* 1976; 40: 85-90.

- 43) McCann DJ, Adams WC. Wet bulb globe temperature index and performance in competitive distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1997; 29: 955-961.
- 44) MacDougall JD, Reddan WG, Layton CR, Dempsey JA. Effect of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. *J Appl Physiol* 1974; 36: 538-544.
- 45) Moore TO, Bernauer EM, Seto G, Park YS, Hong SK, Hayashi EM. Effect of immersion at different water temperatures on graded exercise performance in man. *Aerosp Med* 1970; 41: 1404-1408.
- 46) Mora-Rodriguez R, Del Coso J, Aguado-Jimenez R, Estevez E. Separate and combined effects of airflow and rehydration during exercise in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 1720-1726.
- 47) Morgan DB, Bennett T. The relation between heart rate and oxygen consumption during exercise. *J Sports Med Phys Fitness* 1976; 16: 38-44.
- 48) Morimoto T. Thermoregulation and body fluids: role of blood volume and central venous pressure. *Jpn J Physiol* 1990; 40: 165-179.
- 49) Nadel ER, Stolwijk JA. Effect of skin wettedness on sweat gland response. *J Appl Physiol* 1973; 35: 689-694.
- 50) Noakes TD. Reduced peripheral resistance and other factors in marathon collapse. *Sports Med* 2007; 37: 382-385.
- 51) Nybo L. Hyperthermia and fatigue. *J Appl Physiol* 2008; 104: 871-878.

- 52) Oksa J, Rinyamäki, Rissanen S. Muscle performance and electromyogram activity of the lower leg muscles with different level of cold exposure. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997; 75: 484-490.
- 53) Paolone VJ, Paolone AM. Thermogenesis during rest and exercise in cold air. *Can J Physiol Pharmacol* 1995; 73: 1149-1153.
- 54) Petrofsky JS, Burse HL, Lind AR. The effect of deep muscle temperature on the cardiovascular responses of man to static effort. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1981; 47: 7-16.
- 55) Périard JD, Cramer MN, Chapman PG, Caillaud C, Thompson MW. Neuromuscular function following prolonged intense self-paced exercise in hot climatic condition. *Eur J Appl Physiol* 2011; 111: 1561-1569.
- 56) Pugh LG. Cold stress and muscular exercise, with special reference to accidental hypothermia. *Br Med J* 1967; 2: 333-337.
- 57) Pzos RS, Danzl DF. Human physiological responses to cold stress and hypothermia. In: *Textbooks of Military Medicine: Medical Aspects of Harsh Environments Volume 1*, Virginia: Office of the Surgeon General, U.S. Army, 2002, 351-382.
- 58) Ramanathan NL. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *J Appl Physiol* 1964; 19: 531-533.
- 59) Rowell LB, Brengelmann GL, Blackmon JR, Twiss RD, Kusumi F. Splanchnic blood flow and metabolism in heat-stressed man. *J Appl Physiol* 1968; 24: 475-484.

- 60) Rowell LB, Marx HJ, Bruce RA, Conn RD, Kusumi F. Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *J Clin Invest* 1966; 45: 1801-1816.
- 61) Saltin B. Circulatory response to submaximal and maximal exercise after thermal dehydration. *J Appl Physiol* 1964; 19: 1125-1132.
- 62) Saunders AG, Dugas JP, Tucker R, Lambert ML, Noakes TD. The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiol Scand* 2005; 183: 241-255.
- 63) Sawaka MN, Francesconi RP, Young AJ, Pandolf KB. Influence of hydration level and body fluids on exercise performance in the heat. *JAMA* 1984; 252: 1165-1169.
- 64) Sawaka MN, Noakes T. Does dehydration impair exercise performance? *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 1209-1217.
- 65) Shaffrath JD, Adams WC. Effects of airflow and work load on cardiovascular drift and skin blood flow. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1984; 56: 1411-1417.
- 66) Shephard RJ. Exercise in a cold climate. *Can Fam Physician* 1972; 18: 44-47.
- 67) Shitzer A. Wind-chill-equivalent temperatures: regarding the impact due to the variability of the environmental convective heat transfer coefficient. *Int J Biometeorol* 2006; 50: 224-232.

- 68) Sink KR, Thomas TR, Araujo J, Hill SF. Fat energy use and plasma lipid changes associated with exercise intensity and temperature. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1989; 58: 508-513.
- 69) Stocks JM, Taylor NA, Tipton MJ, Greenleaf JE. Human physiological responses to cold exposure. *Aviat Space Environ Med* 2004; 75: 444-457.
- 70) Thompson RL, Hayward JS. Wet-cold exposure and hypothermia: thermal and metabolic responses to prolonged exercise in rain. *J Appl Physiol* 1996; 81: 1128-1137.
- 71) Timmons BA, Araujo J, Thomas TR. Fat utilization enhanced by exercise in a cold environment. *Med Sci Sports Exerc* 1985; 17: 673-678.
- 72) 東京国際女子マラソン大会 TOKYO INTERNATIONAL WOMEN'S MARATHON 1979-2008. < <http://tokyowomensmarathon.com/>> (2015年3月15日アクセス)
- 73) トムラウシ山遭難事故 調査報告書, トムラウシ山遭難事故調査特別委員会 <<http://www.jfmga.com/pdf/tomuraushiyamareport.pdf>> (2015年3月15日アクセス)
- 74) Trapasso LM, Cooper LD. Record performances at the Boston Marathon: biometeorological factors. *Int J Biometeorol* 1989, 33: 233-237.

- 75) Therminarias A, Flore P, Oddou-Chirpaz MF, Pellerei E, Quirion A. Influence of cold exposure on blood lactate response during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1989, 58: 411-418.
- 76) Vihma T. Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol* 2010; 54: 297-306.
- 77) 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 Regul Integr Comp Physiol* 1997; 272: R2025-R2033.
- 78) Wingo JE, Ganio MS, Cureton KJ. Cardiovascular drift during heat stress: implications for exercise prescription. *Exerc Sport Sci Rev* 2012; 40: 88-94.
- 79) Wray DW, Donato AJ, Nishiyama SK, Richardson RS. Acute sympathetic vasoconstriction at rest and during dynamic exercise in cyclists and sedentary humans. *J Appl Physiol* 1985; 102: 704-712.
- 80) Zhang S, Meng G, Wang Y, Li J. Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners. *Int J Biometeorol* 1992; 36: 63-68.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究を遂行し学位論文をまとめるに当たり、多くのご支援とご指導を賜りました指導教官である中京大学スポーツ科学部 教授 松本 孝朗先生に深く感謝しております。私が博士論文をまとめることができたのは、お忙しい中でも熱心なご指導をしてくださったからに他なりません。また国際誌へ投稿するためのノウハウ、研究の考え方など公私に渡り格別なるご指導を賜りました中京大学スポーツ科学部 教授 梅村 義久先生に深く感謝しております。

貴重なご教示を賜りました中京大学教授 学長 北川 薫先生、元中京大学教授 松井 信夫先生、元中京大学教授 山本 高司先生、中京大学教授 荒牧 勇先生、中京大学教授 桜井 伸二先生、中京大学教授 小山 哲先生、中京大学教授 長滝 祥司先生、追手門学院大学教授 松井 健先生に感謝申し上げます。先生方からのご助言により、本論文が精練されました。また、研究者として教育者としての姿勢も教えて頂きました。本当にありがとうございました。

実験方法、解析、論文投稿など多岐に渡りご指導、ご助言を頂きました愛知みずほ大学講師 山根 基先生、中京大学大学院体育学研究科研究生 山下 直之氏に深く感謝いたします。

本研究を遂行するうえで実験への参加を快く引き受けてくださった運動生理学

研究室の後輩、大学生の皆様に深く感謝いたします。

慣れない大学院生活を笑顔とユーモアで支えて下さった、大学院同期の土岐純代氏、川口 明日香氏に感謝いたします。両氏の支え無くして私の大学院生活はありません。

最後になりましたが、大学・大学院に進学する機会を与えてくださり、経済的、精神的に支援して頂いた父春海と母美枝子、祖母孝子、私の体育学部への進学を両親に説得して下さった姉文、いつも私を温かく見守って下さった亡き祖父母正二、利貞、久子に深く感謝いたします。子々孫々に誇れる人間となり、恩返しさせていただきます。