

運動時の発汗量に換気閾値（発汗量の変曲点）は存在するか

松本 孝朗¹⁾・山下 直之²⁾・稲葉 泰嗣¹⁾・加治木 政伸¹⁾・樊 孟¹⁾・
松岡 大介³⁾・細木 健太郎³⁾・山本 耀太³⁾・水野 博和³⁾・成田 佑二³⁾・
松本 莉奈³⁾・久田 萌可³⁾・高松 奈央³⁾・富永 博子³⁾

Is There Ventilatory Threshold in Sweat Curve during Exercise?

Takaaki MATSUMOTO, Naoyuki YAMASHITA, Taishi INABA, Masanobu KAJIKI,
Meng FAN, Daisuke MATSUOKA, Kentaro HOSOGI, Yota YAMAMOTO,
Hirokazu MIZUNO, Yuji NARITA, Rina MATSUMOTO, Moeka HISADA,
Nao TAKAMATSU, Hiroko TOMINAGA

Abstract

Thermal sweating during exercise is influenced by not only thermal factors, core and skin temperatures, but also non-thermal factors, such as input from muscle metaboreceptor and central command related to exercise. Ventilatory threshold describes the point where pulmonary ventilation increases disproportionately relative to increases in oxygen consumption. The purpose was to determine if ventilatory threshold, bending, exist in sweat curve during exercise. Ten healthy young subjects, 5 men and 5 women, performed an incremental exercise with bicycle ergometer until exhaustion in a climatic chamber set at 30°C and 50% rh. Local sweat rates on the chest and forearm were measured with ventilated capsule method. Sweat occurred or increased around the ventilatory threshold at the early stage of the exercise and increased linearly relative to the progression of exercise intensity, and showed a level-off before the exhaustion. Ventilatory threshold, bending, on sweat curve was demonstrated.

【緒言】

運動負荷テストにおいて、運動強度を漸増すると運動強度（酸素摂取量）に比例して換気量が増加するが、ある点（閾値）を越えると酸素摂取量の増加以上に換気量が増加する換気閾値（Ventilatory Threshold）、あるいは血中乳酸が蓄積し始める乳酸閾値（Lactate Threshold）が存在することはよく知られている^{1), 2)}。換気閾値と乳酸閾値はほぼ一致し、一般人では、最大酸素摂取量の50~60%に相当する²⁾。本研究におけ

る典型例（女性被験者F2）の酸素摂取量と換気量の関係においても、換気閾値と呼吸性代償開始点¹⁾の2つの変曲点が観察された（図1）。コルチゾール、成長ホルモン、カテコラミンなどのホルモン分泌も運動強度が換気閾値を超えると急速に高まることが知られている³⁾。

体温は熱産生量と熱放散量のバランスによって決まり、ヒトの熱放散は主に皮膚血管拡張反応と発汗によって行われる。皮膚血流量が増加し皮膚温が上昇すると、周囲の空気との温度差が大きくなることで、皮膚から空気へ熱を捨て

¹⁾中京大学大学院体育学研究科・²⁾京都工芸繊維大学

³⁾中京大学スポーツ科学部

る（伝導と対流、放射）。汗はエクリン汗腺において血液を材料に産生され、汗管を通じて皮膚表面へ分泌され、皮膚の上で蒸発する際に気化熱を奪うことで、体温を下げる。蒸発せずに滴り落ちた汗は無効発汗とよばれ、体温調節に寄与しない。安静（非運動）時の発汗は、中枢および末梢の温度受容器から視床下部の発汗中枢へもたらされる温度情報（温熱性要因）によりもっぱら制御されるが、運動時の発汗調節には温熱性要因に加えて、種々の非温熱性要因（代謝性因子、セントラルコマンド）が関与することが知られている⁴⁻⁷⁾。

このように、運動負荷を漸増させた場合の発汗応答には、温熱性要因のみならず非温熱性要因が影響している。換気閾値、乳酸閾値以上の強度の運動では、筋中・血中乳酸濃度の上昇やセントラルコマンドの増大により、発汗量も酸素摂取量の増加以上に増加する、つまり、発汗量にも換気閾値（発汗量の変曲点）が存在することが予想される。しかし、この点についての研究は乏しい。

これまで運動時の発汗の研究は、運動初期や比較的軽度から中程度までの発汗量の領域でのものがほとんどで、暑熱環境下での高強度運動時の発汗に関する研究は少ない^{4-7, 10-12)}。最大運動時のような大量発汗を換気カプセル法で測定することが困難であったことがその一因と考えられる。

運動時の発汗量に換気閾値（発汗量の変曲点）が存在するかを検討することを、本研究の目的とした。

【方法】

定期的に運動を行っている健康な大学生（その多くは体育会クラブに所属）、男子5名（年齢21～22歳、身長172.0 ± 5.9 cm、体重65.4 ± 4.4 kg：平均 ± 標準偏差）、女子5名（年齢21～22歳、身長160.6 ± 4.2 cm、体重55.4 ± 2.2 kg）を対象に、漸増運動負荷テストを行わせ、呼気ガス代謝パラメーター（換気量、酸素摂取量、二酸化炭素排泄量、呼吸交換比）と心拍数の測定に加えて、体温（直腸温、皮膚温）と局所発汗量（前胸部、前腕）の測定を行った。被験者の身体特性、競技種目、最大負荷強度、運動時間、最高酸素摂取量の値を、表1、2に男女別に示した。

酸素摂取量と換気量との関係より換気閾値（Ventilatory Threshold）を求め、発汗量における換気閾値（Ventilatory Threshold、発汗量の変曲点）の存在を検討した。漸増運動負荷テストは自転車エルゴメータ（コンビウエルネス社製、AEROBIKE X75 II）を用いて行い、80Wから開始し、3分経過毎に、男子は40W、女子は30Wずつ負荷を増加させ、疲労困憊に至らせた。回転数は50 rpm以上とし、被験者のペースに任せた。運動は、被験者が自転車エルゴメータを漕ぐことが不可能（自己申告）になった場合や回転数が明らかに低下した場合に終了とした。

すべての実験は、室温30℃、相対湿度50%に設定した人工気象室（エスバック社製、大阪）にて実施した。また、屋外での実際の運動時には、無風であっても、走速度分の向かい風を受ける

表1 男性被験者の身体特性、競技種目、最大負荷強度、運動時間、最高酸素摂取量

| | 年齢 | 身長 | 体重 | 競技種目 | 最大負荷強度 | 運動時間 | 最高酸素摂取量 |
|----|------|-------|------|--------|--------|------|-----------|
| | 歳 | cm | kg | | W | 分 | ml/min/kg |
| M1 | 21 | 172 | 65 | 野球 | 240 | 15 | 50.4 |
| M2 | 22 | 165 | 58 | ダンス* | 200 | 12 | 36.3 |
| M3 | 22 | 168 | 67 | 陸上長距離 | 200 | 12 | 32.9 |
| M4 | 21 | 180 | 69 | バドミントン | 280 | 17 | 56.5 |
| M5 | 21 | 175 | 68 | バドミントン | 240 | 15 | 43.9 |
| 平均 | 21.4 | 172.0 | 65.4 | | 232.0 | 14.2 | 44.0 |
| SD | 0.5 | 5.9 | 4.4 | | 33.5 | 2.2 | 9.7 |

SD：標準偏差、*：サークル（他は体育会）

表2 女性被験者の身体特性、競技種目、最大負荷強度、運動時間、最高酸素摂取量

| | 年齢 | 身長 | 体重 | 競技種目 | 最大負荷強度 | 運動時間 | 最高酸素摂取量 |
|----|------|-------|------|--------|--------|------|-----------|
| | 歳 | cm | kg | | W | 分 | ml/min/kg |
| F1 | 22 | 163 | 53 | 陸上長距離 | 200 | 15 | 47.6 |
| F2 | 22 | 160 | 55 | 女子サッカー | 170 | 12 | 42.1 |
| F3 | 21 | 155 | 55 | バスケット | 170 | 14 | 48.1 |
| F4 | 22 | 166 | 59 | テニス | 170 | 10 | 26.1 |
| F5 | 22 | 159 | 55 | テニス* | 140 | 10 | 33.0 |
| 平均 | 21.8 | 160.6 | 55.4 | | 170.0 | 12.0 | 39.4 |
| SD | 0.4 | 4.2 | 2.2 | | 21.2 | 2.5 | 9.6 |

SD：標準偏差、*：サークル（他は体育会）

ため、屋外の状況に近付けるため、前方より微風（風速1.4 m/秒、時速約5 km）を吹かせた。呼気ガス代謝パラメーターの測定は、呼気ガス代謝測定装置（エアロモニタ AE-300S、ミナト医科学株式会社、大阪）を、体温の測定はデータ収集型ハンディタイプ温度計（LT-8、グラム株式会社、さいたま）、局所発汗量の測定は据置型の差分方式局所発汗計（特注品 流量500 ml/分、スキノス技研有限会社、名古屋）を用いた。直腸温プローブは感染防止用のプローブカバーを装着し、被験者自身に肛門から約10 cm挿入させた。男子はハーフパンツのみ着用（上半身はだか）で、女子はハーフパンツと半袖シャツ着用で行った。実験は午前10時～12時あるいは午後3時～5時に実施し、当日の食事摂取は自由とし、実験開始前と実験終了後にはスポーツ

リンクを飲ませた。

ヘルシンキ宣言および中京大学における人を対象とする研究に関する倫理規定に則り、被験者の人権、安全に最大限に配慮し、実験中は心拍数、直腸温をモニターし、AEDを備えた実験室にて実施した。被験者にはあらかじめ、本研究の目的、実験内容の詳細、予想されるリスクについて説明し文書による承諾を得た。

【結果】

酸素摂取量と換気量の関係から、第一変曲点を換気閾値、第二変曲点を呼吸性代償開始点として求めた。最も典型的な結果を示した女性被験者F2を、図1に示した。本例では、換気閾値は3.0分、負荷強度80W、酸素摂取量21.0 ml/kg/min、換気量30.7L/min、呼吸交換比0.88であった。第二変曲点つまり呼吸性代償開始点は8.0分、負荷強度140W、酸素摂取量33.3ml/kg/min、換気量54.4L/min、呼吸交換比1.02であった。

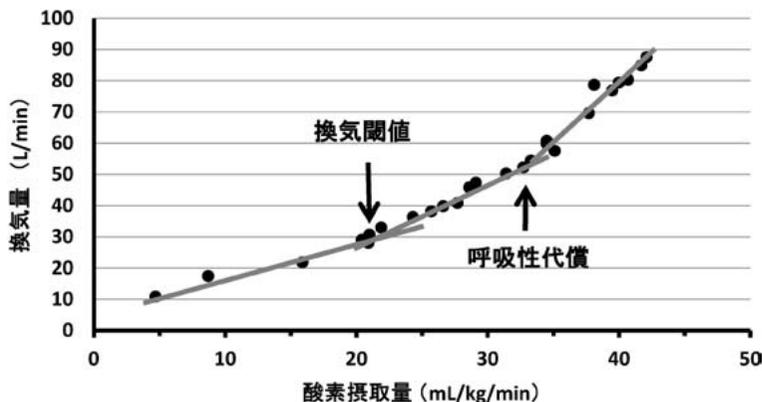


図1 漸増運動負荷時の酸素摂取量と換気量との関係（女性被験者F2）。換気閾値は3.0分、負荷強度80W、酸素摂取量21.0ml/kg/min、換気量30.7L/min、呼吸交換比0.88であった。第二変曲点つまり呼吸性代償開始点は8.0分、負荷強度140W、酸素摂取量33.3ml/kg/min、換気量54.4L/min、呼吸交換比1.02であった。

運動時の発汗量に換気閾値（発汗量の変曲点）は存在するか

表3 男性被験者の発汗潜時、最大発汗量（胸部および前腕）、換気閾値における運動強度、酸素摂取量、運動時間

| | 発汗潜時 | 最大発汗量 | | 換気閾値 | | |
|----|------|-------------------------|-------------------------|-------|-----------|------|
| | | 胸部 | 前腕 | 負荷強度 | 酸素摂取量 | 運動時間 |
| | min | mg/cm ² /min | mg/cm ² /min | W | ml/min/kg | 分 |
| M1 | 1.8 | 2.94 | 1.50 | 120 | 25.8 | 4.0 |
| M2 | 4.2 | 1.36 | 1.25 | 120 | 16.1 | 4.0 |
| M3 | 3.0 | 1.74 | 1.24 | 80 | 20.1 | 2.5 |
| M4 | 1.9 | 2.98 | 1.67 | 120 | 26.1 | 6.0 |
| M5 | 3.3 | 4.03 | 4.07 | 120 | 25.0 | 5.0 |
| 平均 | 2.8 | 2.61 | 1.95 | 112.0 | 22.6 | 4.3 |
| SD | 1.0 | 1.07 | 1.20 | 17.9 | 4.4 | 1.3 |

SD：標準偏差

表4 女性被験者の発汗潜時、最大発汗量（胸部および前腕）、換気閾値における運動強度、酸素摂取量、運動時間

| | 発汗潜時 | 最大発汗量 | | 換気閾値 | | |
|----|------|-------------------------|-------------------------|------|-----------|------|
| | | 胸部 | 前腕 | 負荷強度 | 酸素摂取量 | 運動時間 |
| | min | mg/cm ² /min | mg/cm ² /min | W | ml/min/kg | 分 |
| F1 | 5.7 | 2.34 | 2.30 | 80 | 21.8 | 2.0 |
| F2 | 1.9 | 2.27 | 1.99 | 80 | 21 | 3.0 |
| F3 | 2.0 | 0.60 | 2.00 | 80 | 24.3 | 3.0 |
| F4 | 3.8 | 0.79 | 0.65 | 80 | 16.4 | 2.5 |
| F5 | 0.9 | 0.97 | 0.62 | 80 | 19.5 | 2.0 |
| 平均 | 2.9 | 1.40 | 1.51 | 80.0 | 20.6 | 2.5 |
| SD | 1.9 | 0.84 | 0.81 | 0.0 | 2.9 | 0.5 |

SD：標準偏差

換気量30.7 L/min、呼吸交換比0.88であった。第二変曲点つまり呼吸性代償開始点は8.0分、負荷強度140 W、酸素摂取量33.3 ml/kg/min、換気量54.4 L/min、呼吸交換比1.02であった。

各被験者において同様の解析を行い、各被験者の発汗潜時、最大発汗量（胸部および前腕）、換気閾値における負荷強度、酸素摂取量、運動時間を、表3、4に男女別にまとめた。

各被験者の胸部の局所発汗量の経時的变化を図2、3に男女別にまとめた。各被験者の換気閾値に縦の破線を付して示した。発汗潜時や発汗量には大きな個人差が見られたが（図2、3、表3、4）、多くの被験者において、換気閾値付近において、発汗が開始する、あるいは増加した。その結果、発汗潜時と換気閾値時の運動時間は近接した値を示した（表3、4）。発汗量は、そ

の後、運動強度の増加に伴ってほぼ直線的に増加し、最大運動強度に至る前にプラトーに達する例が多くみられた。

【考察】

本研究では、30℃、相対湿度50%の暑熱環境下にて、疲労困憊に至るまでの漸増運動負荷を行わせ、局所発汗量を連続的に観察し、発汗曲線に換気閾値（発汗の変曲点）が存在するかどうかを検討した。その結果、換気閾値と発汗潜時は近接し、換気閾値付近で発汗が開始あるいは増加した。これらの結果は、運動時の発汗量にも換気閾値（発汗量の変曲点）が存在することを示唆した。McArdleら（2015）が成書で示した通り、換気量の第二変曲点（呼吸性代償の

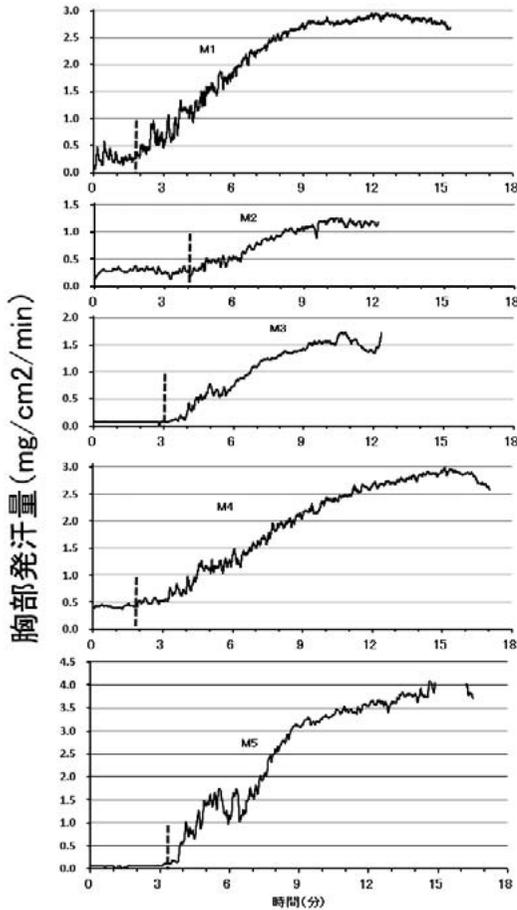


図2 男性被験者5人の局所発汗量(胸部)の経時的变化。各被験者の換気閾値に縦の補助線(破線)を付した。

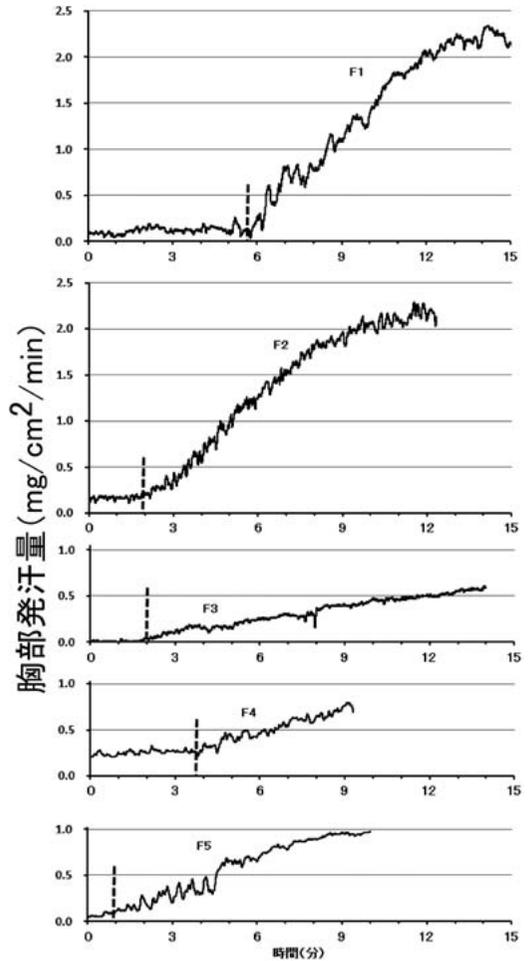


図3 女性被験者5人の局所発汗量(胸部)の経時的变化。各被験者の換気閾値に縦の補助線(破線)を付した。

開始点)は、呼吸交換比が1.0を超える点となった(図1)。

運動を始めると極めて短い潜時で発汗活動が増加する。これは深部体温(鼓膜温、食道温)や皮膚温の上昇に先行する。その後の発汗の増加も深部体温の上昇過程に先行する。特に、運動開始前から発汗している時には、運動開始後ただちに発汗量が増加し始める⁷⁾。運動負荷の急増、急減に際しても同様に迅速な発汗応答が見られる。また、正弦波状に周期的に負荷を変えた運動でも発汗応答は体温、皮膚温変動に先行するし、負荷の変動周期が短いと体温、皮膚

温の変動なしに発汗応答が認められる⁸⁾。

運動開始時や運動負荷急変時の迅速な呼吸促進、心機能亢進などの反応には、運動中枢活動(セントラルコマンド)が呼吸・循環調節系へ拡張することの関与が示されている。運動中枢活動が発汗活動にも関与することも報告されている。筋代謝受容器からの入力、発汗反応に促進的に作用する。これは、深部体温が変化しない状態でも、発汗に対して促進的に作用するものである⁹⁾。

発汗の初期においては、筋中・血中乳酸濃度の上昇やセントラルコマンドにより発汗量が

増加することは多くの研究により示されており^{4,5,7,9)}、本研究において初めて示したわけではない。しかし、この増加のポイントが、換気閾値と一致することは新しい知見といえる。

今回、漸増運動負荷運動を最大運動まで行い、呼気ガス代謝の測定と局所発汗量の測定の両者を精度高く（局所発汗量については微細な発汗波の描出）測定できたことで、このような成果につながったと思われる。また、当然ながら、運動プロトコルや環境条件を変えた追試が必要であろう。

【謝辞】

本研究の一部は中京大学特定研究助成によって行われた。

引用文献

- 1) WD McArdle, FI Katch, VL Katch. Exercise Physiology, Nutrition, Energy, and Human Performance, 8th Ed. Wolters Kluwer, Philadelphia, 2015.
- 2) 勝田茂編著：6章 運動と呼吸，入門運動生理学。杏林書院，東京，2015。
- 3) 井澤鉄也：運動を制御する内分泌系の機能と適応。村岡功編著，スポーツ指導者に必要な生理学と運動生理学の知識，pp.58-75，市村出版，東京，2013。
- 4) 近藤徳彦：運動にかかわる要因と熱放散システム。平田耕造，井上芳光，近藤徳彦編，体温—運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因—。pp.63-88，NAP，東京，2002。
- 5) 近藤徳彦：非温熱性要因が運動時の熱放散反応に及ぼす影響。日生気誌，42(1)，39-53，2005。
- 6) 小川徳雄：蒸発性熱放散。中山昭雄編，温熱生理学。理工学社，東京，pp.135-166，1981。
- 7) 小川徳雄：運動と発汗。体力科学，45，289-300，1996。
- 8) Yamazaki F, Fujii N, Sone R, Ikegami H. Response of sweating and body temperature to sinusoidal exercise in physically trained men. J Appl Physiol, 80(2): 491-495, 1996.
- 9) Crandall CG, Stephen DP, Johnson JM. Muscle metaboreceptor modulation of cutaneous active vasodilation. Med Sci Sports Exec, 30: 490-496, 1998.
- 10) 中山昭雄：運動時の体温調節。中山昭雄編，温熱生理学。理工学社，東京，pp.425-438，1981。
- 11) 中山昭雄，丹羽健市：各種条件下の体温調節，II 運動。中山昭雄，入来正躬編，新生理科学大系 第22巻 エネルギー代謝・体温調節の生理学。東京，pp.309-306，1987。
- 12) Yamauchi M, Matsumoto T, Ohwatari N, Kosaka M. Sweating economy by graded control in well-trained athletes. Pflugers Arch Eur J Physiol, 433(6), 675-678, 1997。