異なる歩行速度を用いた一段階運動負荷試験による 酸素摂取量の時定数の最小可検変化量の検討

Minimum Detectable Change of the Time Constant of Oxygen Uptake of Different Walking Speeds in a Constant Load Test

藤田 大輔¹⁾ 久保 裕介²⁾

DAISUKE FUJITA, RPT, PhD¹⁾, YUSUKE KUBO, RPT, PhD²⁾

¹⁾ Health Science University: 7187 Kodachi, Fujikawaguchiko-machi, Minamitsuru-gun, Yamanashi 401-0380, Japan
TEL +81 555-83-5200 E-mail: d-fujita@kenkoudai.ac.jp

²⁾ Kobori Orthopedics Clinic

Rigakuryoho Kagaku 33(4): 581-585, 2018. Submitted Jan. 17, 2018. Accepted Mar. 8, 2018.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to clarify the minimum detectable change (MDC) in the time constant of oxygen uptake ($\tau\dot{V}O_2$), which is the intervention effect, in a constant load exercise test performed at different walking speeds. [Subjects and Methods] Ten healthy males performed a constant load exercise test twice at walking speeds of 4.5 km/h and 6.0 km/h, and the MDC of $\tau\dot{V}O_2$ was calculated for each speed condition. [Results] The MDC of 4.5 km/h was 14.7 seconds and that of 6.0 km/h was 4.9 seconds. [Conclusion] The MDC of $\tau\dot{V}O_2$ obtained at 6.0 km/h had less measurement error and was similar to the change due to intervention. These results suggest that the intervention effect can be evaluated when $\tau\dot{V}O_2$ changes by 4.9 seconds or more in a constant load exercise test set performed at 6.0 km/h.

Key words: constant load exercise test, time constant of oxygen uptake, minimum detectable change

要旨:〔目的〕本研究は異なる歩行速度において一段階運動負荷試験の酸素摂取量の時定数 ($\tau\dot{V}O_2$) の介入効果の基準となる最小可検変化量 (MDC) を明らかにすることを目的とした。〔対象と方法〕対象は健康成人男性 10 名とし、4.5 km/h と 6.0 km/h による異なる歩行速度条件を設け、それぞれの速度条件における一段階運動負荷試験を 2 回ずつ行い、各速度条件において $\dot{V}O_2$ の MDC を求めた。〔結果〕4.5 km/h の MDC は 14.7 秒、6.0 km/h は 4.9 秒であった。〔結語〕6.0 km/h によって得られた $\tau\dot{V}O_2$ の MDC は 4.5 km/h よりも測定誤差が少なく、介入による変化量と近似していた。そのため、6.0 km/h に設定した一段階運動負荷試験における $\tau\dot{V}O_2$ が 4.9 秒以上変化した場合、介入効果と判断できることが示唆された。

キーワード: 一段階運動負荷試験, 酸素摂取量の時定数, 最小可検変化量

¹⁾ 健康科学大学 健康科学部 理学療法学科: 山梨県南都留郡富士河口湖町小立 7187 (〒401-0380) TEL 0555-83-5200

²⁾ こぼり整形外科クリニック

I. はじめに

運動によって引き起こされる生理学的変化の評価は心血管系の疾患リスクを持つ人において運動処方立案や運動療法の効果判定に有用な情報を得ることができる。特に、最大下運動負荷試験によって得られる $\dot{V}O_{2peak}$ (peak oxygen uptake) は臨床において用いられている運動耐容能の評価指標である¹⁾。一方、運動負荷強度を一定にした一段階運動負荷試験の酸素摂取量は3相に分けることができる²⁾。

まず、第1相は **cardiodynamic component** と呼ばれている。運動開始時には、筋ポンプ作用の活性によって静脈環流量が増加するため1回拍出量を増加させる。そのため、心拍出量が増大し酸素摂取量 (volume of oxygen uptake: 以下、 $\dot{V}O_2$) を上昇させる³⁾。つまり、第1相は心拍出量の増加による $\dot{V}O_2$ の上昇を示している。次に、第2相は **primary component** と呼ばれている。この第2相における指数関数的な酸素摂取量の立ち上がりの速さは、時定数 (タウ: τ) によって評価することができ、 $\tau\dot{V}O_2$ と呼ばれている。 $\tau\dot{V}O_2$ は酸素摂取量が定常状態になるまでの時間の約63%の時間を示している。そして、第3相は運動開始から約3分後に $\dot{V}O_2$ が定常状態になることを示している。 $\tau\dot{V}O_2$ は運動に必要な酸素を供給する速度と酸素を使ってATPを産生する速度によって制御されており⁴⁾、運動負荷にどの程度まで耐えられるかという運動耐容能とは異なる指標であると考えられる。

また、酸素摂取量の観点から $\dot{V}O_{2peak}$ や無酸素性代謝閾値 (anaerobic threshold: AT) は酸素を供給する心臓や肺の能力を反映するとされており⁵⁾、我々の研究では前運動を挿入した中等度負荷の一段階運動負荷試験における $\tau\dot{V}O_2$ は $\dot{V}O_{2peak}$ との相関関係を認めなかったことから、 $\tau\dot{V}O_2$ は酸素供給能力から独立した指標であることを示唆している⁶⁾。 $\tau\dot{V}O_2$ を指標にした介入研究では、慢性心不全患者や地域在住高齢者に対する持続的トレーニングとインターバルトレーニングの効果に関する研究^{7,8)}が報告されており、最大下運動負荷試験よりも運動強度が低い中等度の一段階運動負荷試験によって運動療法の介入効果を評価できることが示唆されている。さらに、 $\dot{V}O_2$ の平均反応時間 (第1相と第2相の時間の和) は、軽度から中等度の慢性心不全患者の死亡率を予測するうえで $\dot{V}O_{2peak}$ よりも精度が良い指標であることが報告されているため⁹⁾、臨床上有用な指標であると考えられる。

歩行を用いた酸素摂取量の時定数の信頼性は、2回の測定で評価指標として活用できると報告されている¹⁰⁾。しかし、測定の誤差範囲である最小可検変化量 (minimal detectable change: 以下、MDC) に関する検討はされていないため、介入によって改善したと判断できる基準

について明らかではない。そこで、本研究の目的は健康者を対象に通常歩行条件として4.5 km/h、速歩条件として6.0 km/hの異なる歩行速度を用いて一段階運動負荷試験による $\tau\dot{V}O_2$ のMDCについて明らかにすることとした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は整形外科的、神経学的、内科学的に異常の無い健康成人男性10名とした (年齢: 20.0 ± 1.0 歳、身長: 168.0 ± 7.5 cm、体重: 62.7 ± 10.7 kg: 平均 $\pm$ 標準偏差)。実験の24時間前には激しい運動やアルコール、カフェインの摂取を控えるように指示した。被験者には口頭ならびに書面にて十分な説明を行い、同意を得た。なお、本研究は健康科学大学研究倫理委員会の承認を受けて実施した (承認番号: 第11号)。

2. 方法

酸素摂取量の時定数はトレッドミルを用いた一段階運動負荷試験にて測定した。使用機器は呼気ガス分析装置 (AE-300S, ミナト医科学社製) とトレッドミル (AR-100, ミナト医科学社製)、心電図モニター (BMS-2401, 日本光電社製) とした。サンプルガスの測定のためにマスクを被験者に装着させ、空気漏れがないようにバンドの長さを調節し、マスクにサンプリングチューブを装着した。呼気ガス分析装置から得られるデータは、**breath-by-breath** 法によって計測した。

運動負荷試験中のリスク管理として、心拍数を胸部双曲誘導 (CM5) によって導出し、モニタリングした。運動プロトコルは、トレッドミル上に置いた椅子にて安静座位を5分行った後、即座に立位となり、トレッドミル歩行を6分間実施した。トレッドミル歩行の速度は川上ら¹¹⁾の報告を参考に、日常生活における歩行速度として4.5 km/hを設定し、速歩条件として健康づくりのための身体活動基準2013¹²⁾を参考に6.0 km/hを設定した。その後、クーリングダウンとして3.0 km/hにて1分間のトレッドミル歩行を行った。測定は30分以上の休憩を挟んで計4回測定し、各速度条件はランダムに設定した。

$\tau\dot{V}O_2$ の算出方法は、一段階運動負荷試験中に得られる $\dot{V}O_2$ データの10秒ごとの平均値を用いた。運動開始時の筋代謝に関係のない $\dot{V}O_2$ の増加分 (time delay: 以下、TD) を除くため、運動開始直後の20秒間のデータを削除し、フィッティングさせた (図1)。時定数は、Microsoft Office Excel 2013 (マイクロソフト社製) に添付されている最適解検索ツールであるソルバーを用いて、以下の非線形回帰による指数関数モデルで回帰した。

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_{2b} + A(1 - e^{-(t-TD)/TC})$$

なお、 $\dot{V}O_2(t)$ は、時間 t における $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}O_{2b}$ は安静時の平均 $\dot{V}O_2$ 、 A は安静時から 4–6 分の平均 $\dot{V}O_2$ 、 TD は一段階運動負荷試験開始直後の $\dot{V}O_2$ の遅れ、 TC は $\dot{V}O_2$ の応答速度を示している。

統計分析は Bellcurve for Excel（社会情報サービス社製）を用いて、1 回目と 2 回目の安静時の $\dot{V}O_2$ 、運動開始 4–6 分の $\dot{V}O_2$ の平均値、 $\tau\dot{V}O_2$ に対して対応のある t 検定を行い、各速度条件において $\tau\dot{V}O_2$ に対して級内相関係数（intraclass correlation coefficients：以下、ICC）を求めた。また、 $\tau\dot{V}O_2$ の測定の標準誤差（standard error of measurement：以下、SEM）を各速度条件における 2 回の測定値の差の標準偏差に 1 から ICC を引いた値の平方根を乗じて求め、MDC は $1.96 \times SEM \times \sqrt{2}$ から算出した。有意水準は 5% とした。

III. 結 果

本研究で用いた全ての結果は表 1 に示した。安静時の $\dot{V}O_2$ は 4.5 km/h において 1 回目は 288.5 ± 34.5 ml/min、

図1 酸素摂取量の時定数

○は酸素摂取量が定常状態の約 63% になるまでの時間を示している（これが時定数となる）。

2 回目は 286.6 ± 32.6 ml/min となり、6.0 km/h において 1 回目は 289.9 ± 34.0 ml/min、2 回目は 284.8 ± 47.4 ml/min となった。運動開始後 4 分から 6 分までの $\dot{V}O_2$ の平均値は 4.5 km/h において 1 回目は 829.3 ± 124.4 ml/min、2 回目は 846.0 ± 126.7 ml/min となり、6.0 km/h において 1 回目は 1160.2 ± 134.7 ml/min、2 回目は 1125.7 ± 166.0 ml/min となった。 $\tau\dot{V}O_2$ は 4.5 km/h において 1 回目は 36.7 ± 5.9 秒、2 回目は 39.8 ± 9.6 秒となり、6.0 km/h において 1 回目は 42.6 ± 6.9 秒、2 回目は 43.5 ± 7.0 秒となった。全ての変数において同一速度条件下における 1 回目と 2 回目に有意な差は認められなかった。

$\tau\dot{V}O_2$ の ICC は 4.5 km/h で 0.52、6.0 km/h で 0.83 であった。SEM は 4.5 km/h で 5.3 秒、6.0 km/h で 1.8 秒となった。MDC は 4.5 km/h で 14.7 秒、6.0 km/h で 4.9 秒となった。

IV. 考 察

本研究は異なる歩行速度による一段階運動負荷試験から得られる $\tau\dot{V}O_2$ の MDC について検討した。その結果、6.0 km/h による $\tau\dot{V}O_2$ は 4.5 km/h よりも ICC が高く、SEM ならびに MDC は少ないことが明らかになった。

ICC の基準は、0.81 以上で almost perfect、0.61–0.80 で substantial、0.41–0.60 で moderate、0.21–0.40 で fair、0.0–0.20 で slight と示されている¹³⁾。本研究の結果、4.5 km/h 条件では moderate、6.0 km/h では almost perfect と判定され、6.0 km/h の測定の方が高い再現性があると判断できる。

MDC は 4.5 km/h で 14.7 秒、6.0 km/h で 4.9 秒となり 6.0 km/h の方が少ない値となり、得られた MDC 以上の変化は誤差以上の変化が生じていると解釈することができる。また、運動トレーニング介入によって生じる $\tau\dot{V}O_2$ の変化は、健康成人男性（ 25 ± 4 歳）に対して 90–120 分の持久的トレーニング（60% $\dot{V}O_{2max}$ ）を行っ

表 1 一段階運動負荷試験時の酸素摂取量、ICC、SEM、MDC の結果

	4.5 km/h		6.0 km/h	
	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
VO_2 rest (ml/min)	288.5 ± 34.5	286.6 ± 32.6	289.9 ± 34.0	284.8 ± 47.4
VO_2 4–6 min (ml/min)	829.3 ± 124.4	846.0 ± 126.7	1160.2 ± 134.7	1125.7 ± 166.0
τVO_2 (s)	36.7 ± 5.9	39.8 ± 9.6	42.6 ± 6.9	43.5 ± 7.0
ICC	0.52		0.83	
SEM (s)	5.3		1.8	
MDC (s)	14.7		4.9	

平均値 $\pm$ 標準偏差。 VO_2 rest：安静時の酸素摂取量、 VO_2 4–6 min：運動開始 4–6 分の酸素摂取量の平均値、 τVO_2 ：酸素摂取量の時定数、 ICC：級内相関係数、 SEM：測定の標準誤差、 MDC：最小可検変化量。

た結果、LTの90%負荷の一段階運動負荷試験の $\tau\dot{V}O_2$ はトレーニング前の 23 ± 8 秒から2日後に 19 ± 4 秒と改善した¹⁴⁾。さらに、健康成人男性7名(23 ± 1 歳)を対象に1日2時間の60% $\dot{V}O_{2peak}$ のトレーニングによってトレーニング前の38.1秒から4日後には34.9秒、9日後に32.5秒、30日後に28.3秒と速くなり¹⁵⁾、Muriasら¹⁶⁾は健康成人女性8人(25 ± 5 歳)を対象にした70% $\dot{V}O_{2max}$ の持続的トレーニングを45分、週3回の介入によって中等度負荷(ATの90%)における一段階運動負荷試験による $\tau\dot{V}O_2$ は31秒から22秒には速くなることを報告している。これらの研究における一段階運動負荷試験は自転車エルゴメータで実施しており、直接的に比較することはできないが、運動負荷量はAT未満となっており、本研究と同様である。介入による $\tau\dot{V}O_2$ の変化量は6.0 km/hによって得られた $\tau\dot{V}O_2$ のMDCと近似していることから、健康成人男性では4.5 km/hよりも6.0 km/hによる一段階運動負荷試験の方が介入による変化を適切に表すと考えられる。

誤差は偶然誤差と系統誤差に大きく二分され、偶然誤差は個体誤差と測定誤差に、系統誤差は加算誤差と比例誤差に分けられる¹⁷⁾。本研究では測定誤差に着目して検討を行い、4.5 km/hは6.0 km/hよりも $\tau\dot{V}O_2$ のMDCは大きい結果となった。本研究では先行研究に準じて^{18,19)}一段階運動負荷試験の第1相を20秒として計算しているが、Mezzaniら²⁰⁾は加齢によって第1相は遅延するため、第1相の解析の誤差は第2相の精度に影響すると報告し、第1相の速さは運動開始時における肺への血流増加速度と正の相関を認め、この点は運動開始時の筋ポンプ作用による静脈還流量の増加速度が影響している可能性を示唆した。また、山崎²¹⁾はトレッドミル歩行において50 m/分(3.0 km/h)から130 m/分(7.8 km/h)まで10 mごとの速度で歩幅を測定した結果、90 m/分(5.4 km/h)以上の速度では、歩調(ケイデンス)の方が歩幅よりも速度の増大に寄与したと報告しており、本研究のトレッドミル歩行において4.5 km/hのトレッドミル歩行は6.0 km/hよりもケイデンスが低いと考えられる。そのため、4.5 km/hは筋収縮頻度が少なく、筋ポンプ作用が不十分となり第1相が20秒より遅くなった可能性がある。さらに、本研究において4.5 km/hの1回目と2回目の $\tau\dot{V}O_2$ を比較すると $p=0.11$ と有意ではないが、2回目の方が遅い傾向であったことから4.5 km/hのトレッドミル歩行は一定の歩行パターンではなかったと考えられる。以上のことから、4.5 km/hのトレッドミル歩行は第1相の解析精度が低くなったため、 $\tau\dot{V}O_2$ の測定誤差が大きくなったと考えられる。この点については、第1相を20秒とするのではなく他の解析方法を検討する必要がある。

本研究の限界は対象を健康者としたため、本研究のプロトコルならびにMDCは高齢者や疾患群に適応できな

い点である。今後、心疾患や呼吸器疾患などの疾患群を対象にした場合には個人において歩行速度が異なるため、快適歩行速度を用いた測定の信頼性を検討する必要があると考えられる。

以上のことから、健康者において6.0 km/hの歩行を用いた一段階運動負荷試験は再現性が高く、MDCは適正な範囲内であることが示唆された。

利益相反 本研究の一部は健康科学大学研究助成費の交付を受けて実施した。

引用文献

- 1) 上月正博(編):よくわかる内部障害の理学療法. 医歯薬出版, 東京, 2016, p52.
- 2) DeLorey DS, Paterson DH, Kowalchuk JM: Effects of ageing on muscle O₂ utilization and muscle oxygenation during the transition to moderate-intensity exercise. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2007, 32: 1251-1262.
- 3) Faisal A, Beavers KR, Robertson AD, et al.: Prior moderate and heavy exercise accelerate oxygen uptake and cardiac output kinetics in endurance athletes. *J Appl Physiol* 1985, 2009, 106: 1553-1563.
- 4) Hughson RL: Oxygen uptake kinetics: historical perspective and future directions. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2009, 34: 840-850.
- 5) di Prampero PE, Ferretti G: Factors limiting maximal oxygen consumption in humans. *Respir Physiol*, 1990, 80: 113-127.
- 6) 藤田大輔, 西田裕介: 高強度の前運動を挿入した $\tau\dot{V}O_2$ と $\tau\text{DeoxyHb}$, $\dot{V}O_{2peak}$, ATとの関係. *理学療法科学*, 2015, 30: 465-468.
- 7) Roditis P, Dimopoulos S, Sakellariou D, et al.: The effects of exercise training on the kinetics of oxygen uptake in patients with chronic heart failure. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, 2007, 14: 304-311.
- 8) Daussin FN, Zoll J, Dufour SP, et al.: Effect of interval versus continuous training on cardiorespiratory and mitochondrial functions: relationship to aerobic performance improvements in sedentary subjects. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2008, 295: R264-R272.
- 9) Schalcher C, Rickli H, Brehm M, et al.: Prolonged oxygen uptake kinetics during low-intensity exercise are related to poor prognosis in patients with mild-to-moderate congestive heart failure. *Chest*, 2003, 124: 580-586.
- 10) Arena R, Peberdy MA: Short-term reliability of oxygen uptake on-kinetics in apparently healthy subjects. *J Cardiopulm Rehabil*, 2006, 26: 219-223.
- 11) 川上雅之, 荒木直彦, 猪木原孝二・他: 歩行と生体反応に関する研究—歩行速度と呼吸循環反応—. 倉敷芸術科学大学紀要, 1997, 2: 87-97.
- 12) 厚生労働省: 健康づくりのための身体活動基準2013. <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple.html> (閲覧日2018年2月12日).
- 13) Landis JR, Koch GG: The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 1977, 33: 159-174.

-
- 14) McKay BR, Paterson DH, Kowalchuk JM: Effect of short-term high-intensity interval training vs. continuous training on O₂ uptake kinetics, muscle deoxygenation, and exercise performance. *J Appl Physiol* 1985, 2009, 107: 128-138.
 - 15) Phillips SM, Green HJ, MacDonald MJ, et al.: Progressive effect of endurance training on VO₂ kinetics at the onset of submaximal exercise. *J Appl Physiol* 1985, 1995, 79: 1914-1920.
 - 16) Murias JM, Kowalchuk JM, Paterson DH: Speeding of VO₂ kinetics in response to endurance-training in older and young women. *Eur J Appl Physiol*, 2011, 111: 235-243.
 - 17) 下井俊典：評価の絶対信頼性. *理学療法科学*, 2011, 26: 451-461.
 - 18) Lanfranconi F, Borrelli E, Ferri A, et al.: Noninvasive evaluation of skeletal muscle oxidative metabolism after heart transplant. *Med Sci Sports Exerc*, 2006, 38: 1374-1383.
 - 19) Wilkerson DP, Koppo K, Barstow TJ, et al.: Effect of prior multiple-sprint exercise on pulmonary O₂ uptake kinetics following the onset of perimaximal exercise. *J Appl Physiol* 1985, 2004, 97: 1227-1236.
 - 20) Mezzani A, Grassi B, Giordano A, et al.: Age-related prolongation of phase I of VO₂ on-kinetics in healthy humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2010, 299: R968-R976.
 - 21) 山崎昌廣：日本人の生理. 佐藤方彦（編），朝倉書店，東京，1988, pp138-155.