

原 著

ウェアラブル呼気ガス分析装置を用いた 酸素摂取量測定の妥当性

吉田升^{*1} 玉里祐太郎^{*2} 濱田大幹^{*3} 和田拓真^{*4}
石本恭子^{*4} 松生香里^{*4} 小野寺昇^{*4}

要 約

本研究は、酸素摂取量の測定において、ウェアラブル呼気ガス分析装置の妥当性をダグラスバッグ法との比較から検証することを目的とした。対象者は健康な成人男性9名であった。運動課題は自転車エルゴメーター運動とした。測定条件は、ダグラスバッグを用いて呼気を採取し酸素摂取量を測定するダグラスバッグ条件及びウェアラブル呼気ガス分析装置を用いて酸素摂取量を測定するウェアラブル条件の2条件を設定した。自転車エルゴメーター運動時のペダル回転数は、60rpmとした。運動負荷は1.5kp, 2.0kp, 2.5kpの順に5分毎に漸増させた。測定項目は、酸素摂取量、心拍数及び主観的運動強度(RPE)とした。心拍数、酸素摂取量及びRPEにおいて、ダグラスバッグ条件とウェアラブル条件の2条件間に有意な差はみられなかった。このことから、ウェアラブル呼気ガス分析装置を用いて、酸素摂取量を誰でも簡易的に測定することが可能になることが示唆された。本研究は、各測定項目において、ウェアラブル条件とダグラスバッグの2条件間に有意な差はみられなかった。このことから、ウェアラブル呼気ガス分析装置の妥当性が検証された。

1. 緒言

酸素摂取量は、有酸素性運動能力や全身持久力の客観的な指標として、運動処方強度設定やアスリートの体力測定で用いられている¹⁾。近年は老若男女の体力や健康の重要な指標として用いられることが多くなってきた。酸素摂取量の値が大きければ大きいほど、マラソンや長距離走、サッカーやバスケットボールなどの競技スポーツを高い水準で行うことができる¹⁾。

酸素摂取量の測定方法としてダグラスバッグ法がある。ダグラスバッグ法は一度ダグラスバッグに採取した呼気ガスを乾式ガスメーターでガス量を求め、さらにその一部をガス分析装置で分析してO₂とCO₂の濃度を求めることで酸素摂取量を算出する方法である¹⁾。ダグラスバッグ法の長所は、正確性や信頼性に優れている点である¹⁾。そのため測定した数値の誤差が1.5%以内と精度が高い¹⁾。乾式ガス

メーターやガス分析装置、マスクや蛇管、ダグラスバッグなどの測定装置が必要であり、加えて、測定に技術と経験が必要となる。近年では、プレス・バイ・プレス法で酸素摂取量を測定する方法も多く採用されている²⁾。しかしながら、プレス・バイ・プレス法は、ダグラスバッグ法に比べ測定誤差が大きいことが報告されている¹⁾。プレス・バイ・プレス法は、呼気と吸気のガス濃度の差からO₂とCO₂を求める方法で1970年代に開発された²⁾。この方法によってO₂、CO₂を連続的にかつリアルタイムで測定できるため漸増式運動負荷試験においてプレス・バイ・プレス法は適している²⁾。プレス・バイ・プレス法に基づいた新しいウェアラブル呼気ガス分析装置がいくつか開発されている。ウェアラブル呼気ガス分析装置は、蛇管やケーブル無しで酸素摂取量を測定でき、マスクに付属する分析機器でプレス・バイ・プレス法による分析を瞬時に行うことができる。モバ

*1 岡山短期大学 幼児教育学科

*2 広島工業大学 生命学部 生体医工学学科

*3 ワークプラザ・たんぼぼ

*4 川崎医療福祉大学 医療技術学部 健康体育学科

(連絡先) 吉田升 〒710-8511 倉敷市有城787 岡山短期大学

E-mail: nyoshida@owc.ac.jp

イルデバイスに対応しており、Bluetoothを介して作動しタブレット端末などで操作やデータの保存が可能である。このようにウェアラブル呼気ガス分析装置は操作が簡単になったことや測定者が少なくても済むなどの手軽さに優れており、費用の面に関してもダグラスバッグ法よりも抑えることができる。

ダグラスバッグ法やプレス・バイ・プレス法は、装置や機器の大きさや重量、電源などの影響を受け、測定環境に制限を要する。そのため、酸素摂取量の測定はトレッドミル、自転車エルゴメーター及びハンドエルゴメーターなどを用いた運動が一般的である。近年は、プレス・バイ・プレス法を基にウェアラブル呼気ガス分析装置が開発され、この分析装置を用いることにより、球技スポーツや登山などのフィールドにおいても酸素摂取量の測定が可能となった。日常生活の身体活動における酸素摂取量を誰でも簡易的に測定することができる。

そこで本研究は、酸素摂取量の測定において、ウェアラブル呼気ガス分析装置の妥当性をダグラスバッグ法との比較から検証することを目的とした。

2. 方法

2.1 被調査者

対象者は健康な成人男性9名（年齢：21 ± 1歳，身長：171.9 ± 5cm，体重：67.9 ± 6.8kg，BMI：22.9 ± 1.6，平均値 ± 標準偏差）であった。被験者にはヘルシンキ宣言の趣旨に則り、研究の目的や方法、期待される効果、不利益がないこと、危険を排除した環境とすることについての説明を行ったうえで研究参加の同意を得た。本研究は、川崎医療福祉大学健康体育学科倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号：HSS190011）。

2.2 使用器具、測定条件および測定プロトコル

本研究の運動課題は、自転車エルゴメーター運

動とした。測定条件は、ダグラスバッグを用いて呼気を採取し酸素摂取量を測定するダグラスバッグ条件及びウェアラブル呼気ガス分析装置（以下VO2MASTER；S&ME社製）を用いて酸素摂取量を測定するウェアラブル条件の2条件を設定した。両条件の実施順はランダムとした。自転車エルゴメーター運動時のペダル回転数は、60rpmとした。運動負荷は1.5kp、2.0kp、2.5kpの順に5分毎に漸増させた。測定プロトコルは椅子座位安静を5分間、自転車エルゴメーター運動を15分間とした（図1）。2条件とも安静5分間の呼気ガスはダグラスバッグで採取した。運動中のダグラスバッグ条件における呼気ガスの採気時間は1分間とし、4～5分時（負荷1.5kp）、9～10分時（負荷2.0kp）、14～15分時（負荷2.5kp）で測定した。ウェアラブル条件における呼気ガスのデータは、VO2MASTERを用いて測定した。VO2MASTERはプレス・バイ・プレス法を採用しているため、サンプリング頻度は1呼吸毎である。測定データは機械に転送され、使用者が指定した時間間隔の測定値を算出する。本研究では、データ算出の時間間隔を30秒にし、5分時（負荷1.5kp）、10分時（負荷2.0kp）、15分時（負荷2.5kp）のデータを採用した。

2.3 測定項目

2.3.1 酸素摂取量

酸素摂取量の測定はダグラスバッグとVO2MASTERの二つを用いた。ダグラスバッグで採取した呼気ガスの酸素及び二酸化炭素濃度の分析は、呼気ガスの偏りを取り除いた後に質量分析器（ARCO-2000；アルコシステム社製）を用いて分析した。ガス量及びガス温は、乾式ガスメーター（DC5；品川製作所）で測定した。

本研究で用いたVO2MASTERはプレス・バイ・プレス法で測定するウェアラブル呼気ガス分析装置

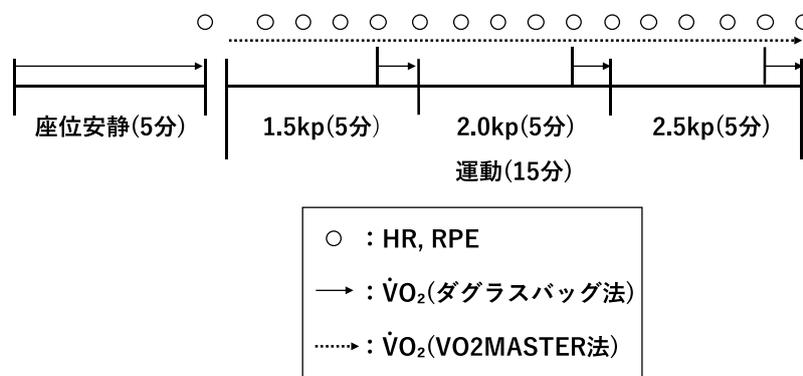


図1 測定プロトコル

で、Bluetooth を介して android 及び iOS モバイルデバイスでデータを収集し、表示する。酸素濃度における測定範囲は0~100%, 測定精度は $\pm 3\%$ 以内。換気量における測定範囲は3~25, 30~160, 40~220L/min, 測定精度は $\pm 3\%$ 以内, 測定環境として温度湿度は10~45°C, 0~70%, 高度は0~3000m。本研究では、換気量30~160L/min のマウスピースを用いた。

2.3.2 心拍数 (Heart Rate ; HR)

心拍数はスポーツ心拍計 (M400; POLAR 社製) を用いて経時的に導出して、運動開始から1分毎に測定した。

2.3.3 主観的運動強度 (Rating of Perceived Exertion ; RPE)

RPE は Borg scale を用いて運動開始から運動終了まで1分毎に測定した。

2.4 統計処理

統計処理は、統計ソフト SPSS for Mac ver. 23 を用いて行った。酸素摂取量, HR, および RPE のデータは平均値 \pm 標準偏差で示した。酸素摂取量, HR および RPE は反復測定による2元配置分散分析を行い、その変化のパターンに交互作用が認められた場合、多重比較 (Bonferroni) を行った。統計学的な有意水準は5%未満とした。

3. 結果

対体重酸素摂取量の変化を図2に示す。両条件と

も、運動強度の増加に伴い、対体重酸素摂取量は有意に増加した ($p < 0.05$)。しかし、条件間に有意な差はみられなかった。ダグラスバッグ条件における運動5分時 (1.5kp) の対体重酸素摂取量の値は 18.73 ± 1.81 (ml/kg/min), 運動10分時 (2.0kp) は 24.76 ± 2.57 (ml/kg/min), 運動15分時 (2.5kp) の 30.36 ± 3.65 (ml/kg/min) であった。ウェアラブル条件における運動5分時 (1.5kp) の対体重酸素摂取量の値は 21.95 ± 4.33 (ml/kg/min), 運動10分時 (2.0kp) は 27.58 ± 4.51 (ml/kg/min), 運動15分時 (2.5kp) は 34.34 ± 3.63 (ml/kg/min) であった。

心拍数の変化を図3に示す。両条件とも、運動強度の増加に伴い、心拍数は有意に増加した ($p < 0.05$)。しかし、条件間に有意な差はみられなかった。ダグラスバッグ条件における運動5分時 (1.5kp) の心拍数は 121 ± 15 bpm, 運動10分時 (2.0kp) の心拍数は 145 ± 22 bpm, 運動15分時 (2.5kp) における心拍数は 165 ± 17 bpm であった。ウェアラブル条件における運動5分時 (1.5kp) の心拍数は 115 ± 15 bpm, 運動10分時 (2.0kp) における心拍数は 137 ± 20 bpm, 運動15分時 (2.5kp) における心拍数は 159 ± 20 bpm であった。

RPE の変化を図4に示す。両条件とも、運動強度の増加に伴い、RPE は有意に増加した ($p < 0.05$)。しかし、条件間に有意な差はみられなかった。ダグラスバッグ条件における運動5分時 (1.5kp) の RPE は 10 ± 2 , 運動10分時 (2.0kp) の RPE は 13

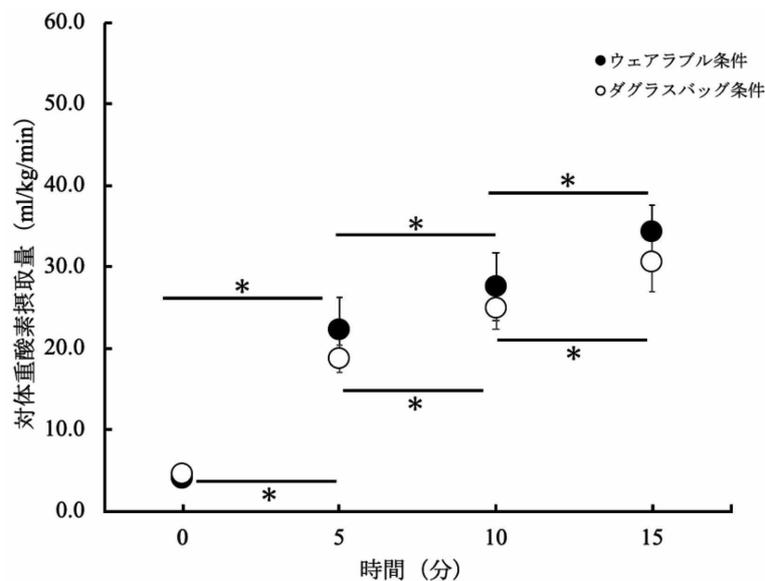


図2 各条件における対体重酸素摂取量の変化

* : $p < 0.05$ (平均値 \pm 標準偏差)

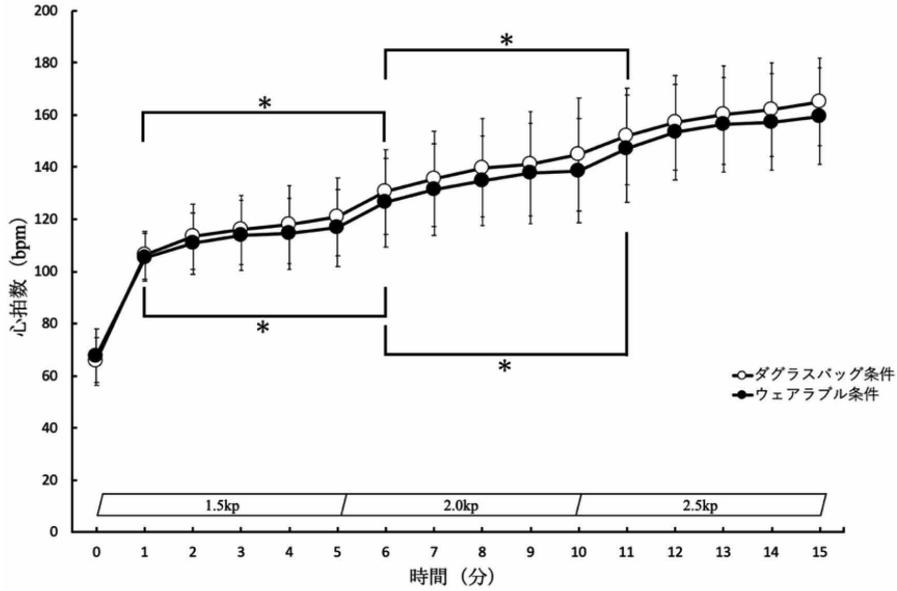


図3 各条件における心拍数の変化

* : p<0.05 (平均値 ± 標準偏差)

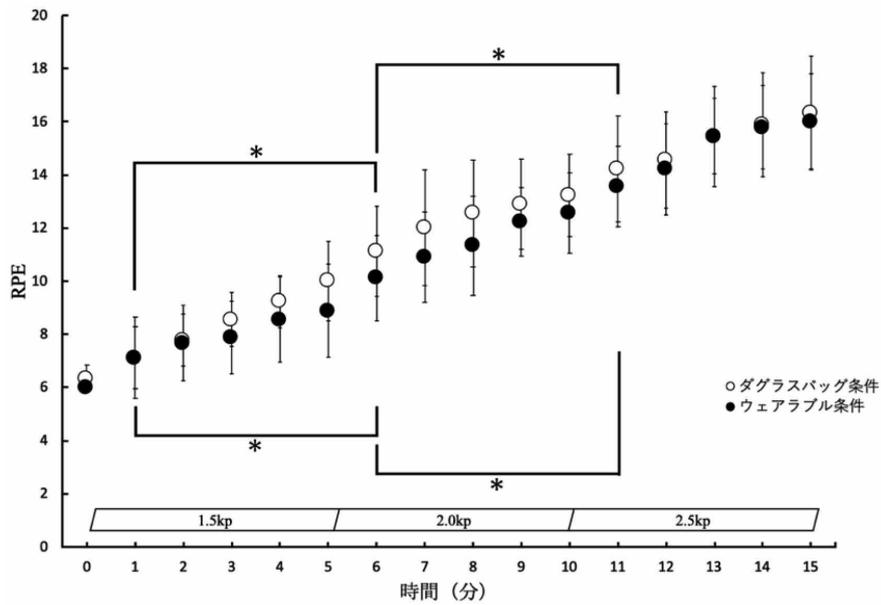


図4 各条件におけるRPEの変化

* : p<0.05 (平均値 ± 標準偏差)

± 2, 運動15分時 (2.5kp) における RPE は16 ± 2であった。ウェアラブル条件における運動5分時 (1.5kp) の RPE は9 ± 2, 運動10分時 (2.0kp) における RPE は12 ± 1, 運動15分時 (2.5kp) における RPE は16 ± 2であった。

分時換気量の変化を表1に示す。運動15分時 (2.5kp) における分時換気量は、ウェアラブル条件と比較して、ダグラスバッグ条件で高値を示した。

酸素濃度の変化を表2に示す。運動15分時(2.5kp) における酸素濃度は、ダグラスバッグ条件と比較し

表1 各条件における分時換気量の変化 (L/min)

	運動5分時 (1.5kp)	運動10分時 (2.0kp)	運動15分時 (2.5kp)
ダグラスバッグ条件	33.5 ± 4.2	44.6 ± 6.3	61.6 ± 13.4
ウェアラブル条件	32.4 ± 3.5	41.7 ± 5.6	56.2 ± 7.6

n=9 (平均値 ± 標準偏差)

表2 各条件における酸素濃度の変化 (%)

	運動5分時 (1.5kp)	運動10分時 (2.0kp)	運動15分時 (2.5kp)
ダグラスバッグ条件	16.8 ± 0.3	16.8 ± 0.3	17.2 ± 0.4
ウェアラブル条件	16.4 ± 0.6	16.2 ± 0.5	16.5 ± 0.4

n=9 (平均値 ± 標準偏差)

て、ウェアラブル条件で低値を示した。

4. 考察

心拍数と RPE において、ダグラスバッグ条件とウェアラブル条件の2条件間で有意な差はみられなかった。両条件とも運動負荷の増加に伴い、心拍数と RPE が増加した。佐藤ら³⁾は、心拍数は中等度以上の運動では指数関数的に増加し、運動強度と心拍数は直線関係であると報告している。また心拍数は運動開始とともに上昇を始め、数分後には定常状態に達する^{4,5)}。そして、運動実施者本人も心拍数や換気量の増加や変化を自覚するため、RPE も運動強度とともに増加する⁶⁾。本研究においても運動強度の増加にともない、心拍数と RPE が増加し、各運動負荷において定常状態であることが観察された。このことを踏まえ、各運動負荷に対する酸素摂取量は各運動負荷の運動5分時を測定値とした。

酸素摂取量は、ダグラスバッグ条件とウェアラブル条件の2条件間に同じ有意な差はみられなかった。しかし、各条件とも運動負荷の増加に伴い、酸素摂取量は増加した。與座ら⁷⁾は、携帯型分析器と固定型分析器における酸素摂取量の変化に有意な差はみられず、若干の誤差はあるものの、臨床上許容できる範囲であると報告した。また、上村と秋山⁸⁾は、ダグラスバッグ法とプレス・バイ・プレス法で酸素摂取量に有意な差はみられなかったと報告している。本研究も先行研究と同様、測定機器の違いによ

る酸素摂取量の変化に有意な差はみられなかったことから、若干の誤差はみられるものの、ウェアラブル呼気ガス分析装置は、ダグラスバッグ法と同等であると考えている。しかし、本研究では、ウェアラブル呼気ガス分析装置の方がダグラスバッグ法よりも約 3.34ml/kg/min 高い結果であった。このことは、ウェアラブル条件の酸素濃度が、ダグラスバッグ条件よりも低値であったことが要因だと考える。呼気の酸素濃度が低値を示すということは、体内で酸素拡散が行われているということである。その結果、二酸化炭素の排出が多くなり、酸素摂取量は高値を示す。ウェアラブル条件の酸素摂取量が高値を示した要因は、VO2MASTER の呼気ガスセンサーが酸素濃度を低く評価したためだと考える。このことは、更なる検討が必要である。これらのことから、ウェアラブル呼気ガス分析装置を使用する場合は、少し高い測定値を示すことを考慮する必要がある。以上のことから、ウェアラブル呼気ガス分析装置を用いて、様々な運動・スポーツや日常生活の身体活動における酸素摂取量を誰でも簡易的に測定することが可能になることが示唆された。

5. まとめ

本研究は、ウェアラブル条件とダグラスバッグ条件の2条件間に有意な差はみられなかった。このことから、ウェアラブル呼気ガス分析装置の妥当性が検証された。

謝 辞

本研究を行うにあたりご協力いただきました、川崎医療福祉大学医療技術学部健康体育学科4年庄形知矢氏に感謝申し上げます。

文 献

- 1) 山地啓司：最大酸素摂取量の科学. 改訂, 杏林書院, 東京, 2001.
- 2) 星川佳広, 山本義春：運動時の呼吸循環動態の解釈をめぐって. 生体医工学, 11(1), 47-48, 1997.
- 3) 佐藤佑, 石河利寛, 青木純一郎, 清水達雄, 前嶋孝：運動に対する心拍数, 血圧, 呼吸数の反応の年齢別, 性別特性に関する研究. 体力科学, 26(4), 165-176, 1977.
- 4) 春日規克, 竹倉宏明：運動生理学の基礎と発展. 改訂版, 有限会社フリースペース, 東京, 2006.
- 5) 健康・体力づくり事業財団編：健康運動指導士養成講習会テキスト (上). 健康・体力づくり事業財団, 東京, 2016.
- 6) 健康・体力づくり事業財団編：健康運動指導士養成講習会テキスト (下). 健康・体力づくり事業財団, 東京, 2016.
- 7) 與座嘉康, 池田綾美, 井出下なつみ, 豊住知己：携帯型呼気ガス分析器 (AE-100i) の測定誤差について—一固定型呼気ガス分析器 (AE-310S) との比較から— . 理学療法科学, 34(2), 249-252, 2019.
- 8) 上村さと美, 秋山純和：呼気ガス分析器の問題点を解決する過程を経験して. 理学療法科学, 24(6), 941-948, 2009.

(令和2年6月23日受理)

Validity of Oxygen Uptake Measurement Using a Wearable Breath Gas Analyzer

Noboru YOSHIDA, Yutaro TAMARI, Hiroki HAMADA, Takuma WADA,
Yasuko ISHIMOTO, Kaori MATSUO and Sho ONODERA

(Accepted Jun. 23, 2020)

Key words : wearable breath gas analyzer, oxygen uptake, Douglas bag

Abstract

The purpose of this study was to verify the validity of the wearable breath gas analyzer in comparison with the Douglas bag method in measuring oxygen uptake. Two measurement conditions were set: a Douglas bag condition in which breath was sampled using a Douglas bag and oxygen uptake was measured, and a wearable condition in which oxygen uptake was measured using a wearable breath gas analyzer. The pedal rotation speed during bicycle ergometer exercise was 60 rpm. Exercise load was gradually increased every 5 minutes in the order of 1.5 kp, 2.0 kp, and 2.5 kp. The measurement indexes were heart rate, oxygen uptake and rating of perceived exertion (RPE). There was no significant difference in heart rate, oxygen uptake, and RPE between the Douglas bag condition and the wearable condition. This suggests that the validity of the wearable breath gas analyzer was verified.

Correspondence to : Noboru YOSHIDA

Okayama College

Kurashiki, 710-8511, Japan

E-mail : nyoshida@owc.ac.jp

(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.30, No.1, 2020 243 – 248)