携帯型酸素摂取量測定装置の評価と応用

樋口 隆 尚* 田村 俊 世** 戸川 達 男**

EVALUATION OF AMBULATORY OXYGEN UPTAKE MONITOR

TAKANAO HIGUCHI, TOSHIYO TAMURA and TATSUO TOGAWA

Abstract

A portable device for long-term monitoring of oxygen uptake without discomfort has been developed based on a flow-through principle. The oxygen content of the exhaust gas was kept constant by a servo-controlled blower, so that the flow rate was essentially proportional to the oxygen uptake. This system was evaluated by both a bench test and in exercising human subjects. The limiting current-type oxygen sensor used this portable device produced results which were in good agreement those obtained using a zirconia oxygen sensor ($r=0.999$), and stable values were obtained for at least 15 h. The response time for a stepped oxygen change was 4 s. The air flow rate produced by the blower was proportional to the supplied voltage. The results using a time-of-flight flowmeter were highly correlated with those for a hot-wire anemometer ($r=0.999$). The oxygen uptake of exercising human subjects measured with this portable device showed good agreement with that obtained by a conventional oxygen monitor ($r=0.973$ for cycle ergometer, $r=0.932$ for treadmill). This portable device was able to measure oxygen uptake in subjects during daily activities, and also while driving a car, without disturbance.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1991, 40 : 195~201)

Key words : Portable device, Oxygen uptake, Flow-through system, Servo-control system, Respiratory monitoring

1. はじめに

中高年者の体力, 健康管理, また運動療法を考えるにあたって, エネルギー代謝量は重要な指標となる。これまでに, エネルギー代謝量を直接または間接的に知る方法が数多く確立されてきた。その中で, 酸素摂取量を測定しエネルギー代謝量を知ることが最も信頼性の高い方法とされている。

酸素摂取量の測定には次のような方法がある。ダグラスバッグ方式では, バッグに呼気を採取し, 一定時間のうち, その酸素濃度, 二酸化炭素濃度, ならびに呼気流量を計測して酸素摂取量を

求める。mixing chamber 法および beath-by-breath 法では, 呼気ガス内の酸素濃度, 二酸化炭素濃度と呼気流量を連続的に測定し, 数呼吸または一呼吸ごとに酸素摂取量の変化を知ることができる。

他方, フロースルー方式は, 空気と呼気ガスの混合ガスの酸素濃度, 二酸化炭素ガス濃度とそのときの排気流量を測定し, ガスの濃度と排気流量から酸素摂取量を求める。この方法は, 空気と混合ガスの微小な濃度差を検出するため, 高感度, 高再現性をもつガスセンサを必要とする。

日常生活の酸素摂取量を測定できる携帯型装置として, 古くから Kofranyi-Michaelis 計が用い

*早稲田大学理工学部機械工学科

Department of Mechanical Engineering, School of Science and Engineering, Waseda University

**東京医科歯科大学医用器材研究所

Institute for Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University

〒101 東京都千代田区神田駿河台2-3-10

られている²⁾。さらに近年, Oxylog(P. K. Morgan Ltd., U. K.)が発売された³⁾。Oxylog は, マスク, 2つのポーラログラフ型酸素センサ, 翼車型流量計からなっている。マスクには呼吸弁が取り付けられており, 吸気側に設置された流量計で吸気流量を計測する。同時に呼気の一部をサンプリングし, 呼気酸素濃度を一方の酸素センサで計測する。もう一方の酸素センサでは大気酸素濃度を計測し, 両者の差と吸気流量から酸素摂取量を測定する。この装置は小型軽量であり, 4 METS 程度の運動までは精度良く測定できると報告されている¹⁾。しかし, 異なる酸素センサを使用するため特に長時間測定の場合には再校正を必要とする。またマスクを用いるための煩わしさもある。

われわれは, フロースルー方式を応用して携帯型酸素摂取量測定装置を開発した⁷⁾。被験者の頭部にフードを装着し, 大気と呼気の混合ガスをブロワで強制排気し, そのときの酸素濃度差と排出流量から酸素摂取量を求めた。しかし, 一定の流量で排気するため, 激しい運動ではフード内の酸素濃度が低下して息苦しくなり, 自転車エルゴメータでは 100 W 程度の運動までしか使用できなかった。また, 装置の重量が 7 kg と携帯型として用いるには重かった。

今回, フロースルー方式にサーボ制御機構を加え, 被験者のフード内が一定の酸素分圧に保たれるよう, 排気流量を制御する装置を開発した。本稿では, 開発した装置の信頼性, 再現性ならびに測定の限界について検討を加えた。その方法として, まず構成する酸素センサ等の性能評価を行い, さらに運動負荷時の酸素摂取量を市販の連続測定装置と比較した。またいくつかのフィールド実験を行い, その結果を示した。

II. 装置の概略

開発した装置の概略を述べる。Fig. 1 に装置のブロック図を, Fig. 2 に装置装着時の外観を示す。被験者は頭部にフードを装着する。フードにはホースを介してブロワが接続され, ブロワで連続排気することによりフード内の換気を行う。このとき, 被験者の呼気はフード下部より流入する大気

Fig. 1. Block diagram of oxygen uptake monitoring system. (details in text)

Fig. 2. Photograph of the subject wearing the hood and carrying the monitor on his back.

と混合され, ブロワの手前に接続された流量・温度測定部を流れる。またこの排出ガスの一部を, 別の吸引ポンプにより酸素分圧測定部へ吸引する。排出ガスの流量, 温度測定にはそれぞれ熱バルス式流量計⁴⁾, IC 温度センサを使用し, 酸素分圧は, 限界電流式酸素センサ⁵⁾を用いて測定する。酸素センサからの出力信号は酸素分圧制御部へ送られ, あらかじめ設定された酸素分圧との差

がゼロとなるよう、ブロワの電圧を変化させて流量を操作する。流量、温度、酸素分圧の各データは一定の時間間隔で不揮発性メモリに記憶される。実験終了後、メモリの内容をパーソナルコンピュータにより解析し、酸素摂取量を算出する。その際、呼気中の水蒸気による希釈は考慮せず、フード内ガスは乾燥ガスとして存在するものとして算出した。本装置では呼吸商を1と仮定しておりそのための誤差は生じるが、系全体の精度に対しては無視でき得ると考えられる⁹⁾。

III. 評価方法

A. 酸素濃度

フロースルー方式の装置では、呼気ガスと空気の混合ガスの酸素濃度のわずかな変化をとらえる。よって装置の評価で最も重要なのは、酸素センサの精度、応答および再現性である。本装置に使用している限界電流式酸素センサについて以下のような評価を行った。

まず精度については、対照としてジルコニア式酸素センサを用いた。異なった酸素濃度に対し、限界電流式酸素計とジルコニア式酸素計(LC-700H, 東レ)で同時に測定し、両測定値の比較を行った。次に経時ドリフトについて、センサに空気ガスボンベ中のガスを200 ml/minの流量で15時間にわたって流し、出力をレコーダに記録した。応答特性については、2種類の標準ガスを用意し、電磁弁でガスの流れを交互に切り替えて測定した。

B. 流量

本装置ではブロワの電圧を変化させることにより流量を操作するため、流量がブロワの電圧に比例して変化することが重要な要素となる。そこで、市販の熱線型流量計(RF-L, ミナト医科学)をホースを介してブロワに接続し、電圧-流量特性を測定した。

次に、本装置で排気流量の測定に使用している熱パルス式流量計の精度を調べた。ホースの一端にあらかじめ較正された熱パルス式流量計とブロワを設置し、他端に基準流量計として前述の熱線型流量計を接続して実験を行った。流量の調節は

ブロワの電圧を変化させることにより行い、各流量での両測定値を比較した。

C. 連続測定装置との比較

実験室内で、運動時の酸素摂取量を本携帯型測定装置と市販の酸素摂取量連続測定装置(Magna 88 exercise test system, P. K. Morgan Ltd., U. K.)で測定し、精度の評価を行った。運動には自転車エルゴメータ(RE830, Rodby Elektronik AB)およびトレッドミル(STR-730, 酒井医療)を使用し、それぞれ健康成人男子7名(自転車エルゴメータ被験者:身長 171.7 ± 4.4 cm, 体重 66.8 ± 9.7 kg, トレッドミル被験者:身長 172.4 ± 4.5 cm, 体重 66.9 ± 8.9 kg)について測定を行った。

携帯型装置のブロワは後負荷に弱く、携帯型装置と基準とする測定装置を直列に接続して同時に酸素摂取量を測定することができない。そこで、各被験者に同じ運動を2回行ってもらい、携帯型装置と連続測定装置それぞれで独立に測定を行った。ここで、測定の条件をなるべく一定にするため、異なる日の同時刻に実験を行った。

携帯型装置による測定では、被験者は登山用の背負子で装置を背負った状態で運動を行った。連続測定装置では、被験者にマウスピースとノーズクリップおよび心電図電極を装着し、呼気の一部を連続吸引してガス分析を行う。内蔵のコンピュータで一定時間毎に酸素摂取量や分時換気量などを算出し、心拍数を含む全てのデータはフロッピーディスクに保存される。サンプリング時間間隔はいずれの装置についても10 sに設定して酸素摂取量を測定した。

自転車エルゴメータを用いた運動では、5分間の安静ののち、60 rpmの回転数で25 Wから175 Wまで4分毎に25 Wずつステップ状に負荷を増加させ、運動終了後10分間安静状態を保った。トレッドミル上の運動では、運動前後の安静時間は自転車エルゴメータの場合と同様とし、4 km/hから1 km/hおきに11 km/hの速度まで、各々4分間運動を行った。また、装置の装着が被験者に与える負担を調べるため、各運動負荷中、Table 1に示す項目でアンケートを実施した。

実験終了後、携帯型装置のデータをコンピュー

表 1. アンケート項目

A. 不快感	D. 暑 さ
1. 快 適	1. 涼しい
2. 何ともない	2. 普 通
3. やや不快	3. やや暑い
4. 不 快	4. 暑 い
5. 非常に不快	5. 非常に暑い
B. 息苦しさ	E. 痛 み
1. 特にない	1. 何ともない
2. やや息苦しい	2. やや痛い
3. 息苦しい	3. 痛 い
4. 非常に息苦しい	4. 非常に痛い
C. 呼吸の抵抗感	F. 圧迫感
1. 特にない	1. 特にない
2. ややある	2. ややある
3. ある	3. ある
4. 非常にある	4. 非常にある

タ(PC 9801, NEC)に転送し, 酸素摂取量の算出を行った. また, 連続測定装置のデータも同一のコンピュータに転送し, 両測定値の比較を行った.

両装置による測定値について, 4分間の各運動負荷中に測定された酸素摂取量のうち, 最後の1分間のデータの平均値を求め, これをその運動負荷時の酸素摂取量とした. またこの際, 測定値を次のように標準化した.

一般に生体の代謝量は体表面積に比例し, 代謝量を単位体表面積当りで表すことによりほぼ満足できる標準化が可能であるとされている⁹⁾. そこで, 酸素摂取量を単位体表面積当りに換算して測定値の比較を行った. 体表面積の算出式は数種類が提唱されているが, ここでは, ヒトの体表面積の算出式のうち, 最も広く使用されているDuBoisの身長体重式を用いた. DuBoisによる体表面積の算出式は次の通りである⁹⁾.

$$S = W^{0.425} \times H^{0.725} \times k$$

ここで, Sは体表面積 m^2 , Wは体重 kg , Hは身長 cm , k は人種により異なる定数で, 日本人の場合は0.007246(高比良による)である.

IV. 結 果

A. 酸素濃度

Fig. 3 に限界電流式酸素計とジルコニア式酸素

Fig. 3. Comparison of oxygen fraction obtained by a zirconia sensor and a limiting current type sensor.

Fig. 4. Relationship between supplied voltage of blower and air flow rate. Solid line represents a linear regression line.

計を用いて比較した酸素濃度を示す. 両者の間には高い相関がみられ ($r=0.999$), 最大誤差は0.4%であった.

経時ドリフトは, 15時間の計測で最大0.9%の誤差を示した.

応答特性は時間遅れ0.7s, 応答時間4sであった.

B. 流量

Fig. 4 にブロワ印加電圧—流量特性を示す. 流量はブロワの電圧に比例し, 両者の間には高い相

Fig. 5. Comparison of normalized oxygen uptake obtained by the Magna 88 and our portable device with (a) a cycle ergometer and (b) a treadmill.

関がみられた($r=0.998$).

また熱パルス式流量計による測定値は, 15 l/min から 155 l/min の流量範囲で熱線型流量計で測定した値との間に高い相関が得られた($r=0.999$).

C. 連続測定装置との比較

Fig. 5 に, 両装置により測定した酸素摂取量の関係を示す. (a) に自転車エルゴメータで運動した時の測定値を示し, (b) にトレッドミル上で運動した場合の測定値を示した. トレッドミルにおける測定値のばらつきが大きかったが, 運動の性質上, 2 回の測定条件を同一にすることが困難であったためと思われる.

携帯型装置と市販の装置との間の相関係数は, 自転車エルゴメータにおいて 0.973, トレッドミルでは 0.932 であった. また, 安静時も含めて運動負荷別に測定値を比較した結果, いずれも最大負荷まで両者の間に有意差はみられなかった (Paired t-test, $p>0.1$).

アンケートを集計した結果, 運動負荷が軽い間は同程度の回答であったが, 負荷が増すにつれて両装置の装着感に差異が生じた. 暑さについては, 携帯型装置で測定した場合の方が暑くなる傾向にあった. その他の項目については, 連続測定装置で測定した際に, より負担が大きい結果とな

り特に呼吸の抵抗感と痛みを訴えた者が多かった.

V. 応 用

装置の応用として, 軽作業を中心としてフィールド実験を行った. 被験者は携帯型装置のフードを被り, 酸素摂取量を測定すると共に, ホルター心電計 (8500, Marquette Electronics Inc., U. S. A.) を装着して心拍数を測定した.

A. 研究室内での測定

卒業研究の被験者 (男子, 22 歳, 172 cm, 66 kg) を対象に, 研究室内での軽作業, コンピュータ作業, 昼食時の酸素摂取量および心拍数を約 6 時間にわたり連続測定した. 酸素摂取量のサンプリング間隔は 30 s とした. Fig. 6 に測定結果の一部を示す. コンピュータを中心とした軽作業中は 250~300 ml/min の酸素摂取量であり, 心拍数は 75 beats/min 前後を記録している. 階段の昇降で酸素摂取量, 心拍数が上昇, 下降を示している.

B. 自動車運転時の測定

別の被験者 (男子, 22 歳, 170 cm, 65 kg) により, 自動車運転中の酸素摂取量と心拍数を約 1 時間測定した. 装置は運転席の後部に設置し, 運転に支障をきたさないようにした. 酸素摂取量のサンプリング間隔は 20 s とした. Fig. 7 に測定結果

Fig. 6. Heart rate and oxygen uptake in a student during routine laboratory activities including computer work.

Fig. 7. Heart rate and oxygen uptake in a student while driving a car.

を示す。運転開始後約20分で酸素摂取量はほぼ 250 ml/min で安定したが、心拍数は終始 120 beats/min 前後の比較的高い値を示した。

VI. 検 討

フロースルー方式による酸素摂取量測定ではわずかな酸素濃度変化を検出する必要がある。限界電流式酸素センサにより測定した酸素濃度は市販のジルコニア式酸素計による測定値との間に高い

相関を示し、本センサはフロースルー方式に用いる酸素センサとして十分な精度を有しているといえる。

また、限界電流式酸素センサの経時ドリフトはわずかであり、長時間の酸素摂取量測定を行う際に、センサを途中で再校正する必要のないことがわかった。

ブロウにより排出される気体の流量は印加電圧に比例していた。このことは、本装置においてブ

ロワの電圧変化が精度良く流量変化に反映され、制御系の動作が正確に行われていることを示している。

熱パルス式流量計については市販の熱線型流量計との間に高い相関が得られ、十分な精度で排気流量を測定できることが確認された。

市販の連続測定装置と酸素摂取量測定値を比較した結果、自転車エルゴメータについては安静時から175 Wまで、トレッドミルの場合は安静時から11 km/hまで両測定値間に有意差がみられなかった (Fig. 5)。このことは、本装置では、個人によりばらつきはあるものの、およそ9 METSの運動までは精度良く測定できることを示している。

これまでに開発された酸素摂取量測定装置ではマスクやマウスピースを使用し、被験者にとっては圧迫感や煩わしさがあった。今回の実験で被験者に対して行ったアンケートでは、運動が激しくなるほど、フードを用いる方が被験者に負担を与えない結果となっている。特に、呼吸の抵抗感や痛みがかなり軽減されていることがわかった。

本装置では、運動の増加とともに排気流量が増加してフード内の酸素分圧を一定に維持し、またこのときフード下部より流入する空気による冷却効果もあって被験者の環境が良好に保たれる。しかし、激しい運動をした場合には、排気による効果が、体温上昇、発汗にともなうフード内の温度上昇を抑えることができなかった。

最後に、本装置を用いたフィールド実験では、食事を含めた軽作業中の酸素摂取量を長時間にわたり支障なく測定することができた。また自動車運転中においても、フード装着による視野の減少はほとんどなく、安全に測定を行うことができた。

謝 辞

稿を終えるにあたり、限界電流式酸素センサを御提供下さいました株式会社豊田中央研究所高橋英昭博士、五十嵐伊勢美博士に深謝致します。また、実験の遂行に御協力頂いた横河メディカルシステム株式会社佐藤和彦氏に深く感謝致します。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金試験研究B (63870009) による。

(受付 平成2年4月15日)

文 献

- 1) Ballal, M. A. and Macdonald, I. A. (1982) : An evaluation of the Oxylog as a portable device with which to measure oxygen consumption. *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, **3**, 57-65.
- 2) Consolazio, C. F. (1971) : Energy expenditure studies in military populations using Kofranyi-Michaelis respirometers. *Am. J. Clin. Nutrition*, **24**, 1431-1437.
- 3) Humphrey, S. J. E. and Wolff, H. S. (1977) : The Oxylog. *J. Physiol. (London)*, **267**, 12 P.
- 4) 根本 鉄, 戸川達男(1983) : 熱移動形スパイロメータ. 計測自動制御学会論文集, **19**, 314-318.
- 5) 佐治啓市, 近藤春義, 高橋英昭, 武内 隆, 五十嵐伊勢美(1985) : 限界電流式酸素センサ. 電子通信学会, **CPM 85-63**, 19-25.
- 6) 佐藤和彦, 田村俊世, 根本 鉄, 戸川達男(1987) : 酸素摂取量測定装置の開発. 電子通信学会, **MBE 856-75**, 25-32.
- 7) 田村俊世, 中島研二, 戸川達男(1983) : 携帯用酸素摂取量計測装置の開発. 体力科学, **32**, 49-57.
- 8) 問田直幹, 内藤耕二, 伊藤正男, 富田忠雄(1982) : 新生理学下巻(植物的機能編), 第5版, 身体の活動水準とエネルギー代謝. 医学書院, 東京, 559-560.