

〔一般演題〕

パラマグネティック電極使用のガス分析器 (CARDIOPAC) とレスピロモニター (RM-300) の組合せによる, 酸素消費量・炭酸ガス排泄量の連続モニターの精度の検討

中島 康一* 小松 明* 下起 明*

徹* 西脇 公俊* 純** 島田 康弘*

酸素消費量 ($\dot{V}O_2$), 炭酸ガス排泄量 ($\dot{V}CO_2$) は, 生体の代謝・栄養の評価の指標として有用であり, その測定法として, 閉鎖回路法, mixing-chamber 法, breath-by-breath 法などが考案されてきた。このうち breath-by-breath 法は, 吸・吸気ガス濃度およびガス流量を連続的に積算することにより, 肺における酸素・炭酸ガスのガス交換をみるものであり, 吸気ガス濃度変動時や各種薬剤負荷時などにおいても, 生体の代謝応答を連続的に評価しうる点で優れている。しかしこれまでは, 挥発性麻酔薬の存在下では, 主に酸素電極の材質と応答速度の点から, 質量分析計を用いる以外では, breath-by-breath に $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ を測定

することが不可能であり, 高価な設備を必要とした。最近, 応答速度の速いパラマグネティック電極を使用したガス分析器 (Cardiopac; Datex) が開発されたため, 当器とレスピロモニター (RM 300; ミナト医科) との組合せによる $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ の測定および精度の検定を Area-mid-point 法によるガス分析器の応答速度の補正¹⁾ (図 1) を用い, よる種々の Time Constant (ΔTC) 下に行い, 麻酔中の使用の可能性を検討したので報告する。

装置

ガス分析器 (Cardiopac) は, 酸素電極として, 応答速度 450 msec 以下のパラマグネティック電極を用い, また, 炭酸ガス測定のために応答速度 250 msec 以下の赤外線吸光分析計を用いたガス分析器であり, その測定誤差は, 酸素・炭酸ガスともに $\pm 2\%$ 以内である。また, レスピロモニター (RM 300) は, 熱線流量計 (ミナト医科学) に加えて breath-by-breath に $\dot{V}O_2$ ・ $\dot{V}CO_2$ ・呼吸商等を演算できる micro processor を備えた装置であり, ガス分析器の遅れ時間 (delay time) および ΔTC の補正是 Keyboard を通して設定することができる。この流量計の精度は $\pm 2\%$ 以内であり, 種々の条件下での測定は吉矢らの発表したごとくである²⁾。

対象・方法

対象は, 健常成人 2 名を用い, 気温 25 度, 自発・空気呼吸下で, 安静時および運動負荷時に 50 呼吸を精算することにより測定した。実験の構成

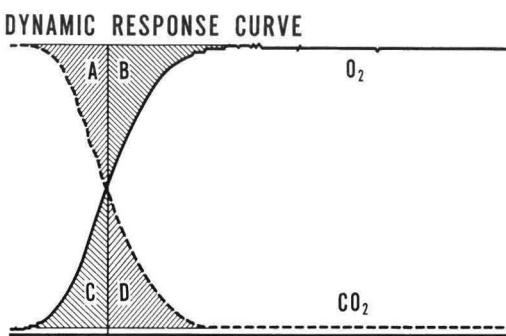


図 1 Area-mid-point 法による応答速度補正の例

CO_2 は斜線部 A と D の面積が等しくなる点, O_2 は斜線部 B と D の面積が等しくなる点をそれぞれ delay time として求める。一次補正をしていないため左右非対称の曲線であり, そのため ΔTC で補正する。

* 名古屋大学医学部医学講座

** 名古屋大学医学部附属病院集中治療部

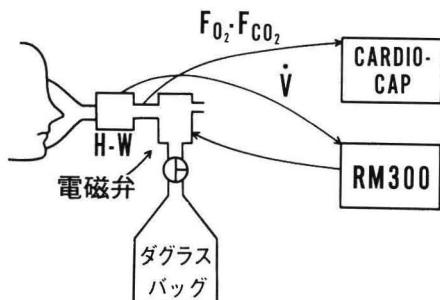


図 2 実験の構成図

図を図2に示す。被験者はマスクをつけ空気呼吸を行う。マスク直後に熱線流量計およびガス分析器のサンプル吸引口をおき、次に呼気採取のための電磁弁をおいた。電磁弁は、熱線流量計の吸呼気変換信号に同期させた。呼気ガスはダグラスバッグに採取し、採取したガス量は21の較正用シリソジを用いて測定した。バッグ内の平均酸素・炭酸ガス濃度、および吸気のガス濃度は、Cardio-capを用いて測定した。ガス採取法による $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$ bag)・ $\dot{V}CO_2$ ($\dot{V}CO_2$ bag)・分時換気量 ($\dot{V}E$ bag) の算出には、次式を用いた。

$$(1) \dot{V}E \text{ bag} = V \text{ bag} \times \frac{60}{T} \times 1.075 \text{ (l/min)}$$

V bag: ダグラスバッグ内の呼気容量 (l)

T: 50呼吸に要した時間 (sec)

1.075: BTPS ファクター

$$(2) \dot{V}CO_2 \text{ bag}$$

$$= \dot{V}E \text{ bag} (FECO_2 - FICO_2) \times 0.826 \text{ (ml/min)}$$

FECO₂: 呼気炭酸ガス濃度

FICO₂: 吸気炭酸ガス濃度

0.826: STPD ファクター

$$(3) \dot{V}O_2 \text{ bag}$$

$$= \frac{\dot{V}E \text{ bag} (FIO_2 - FEO_2) \times 0.826}{1 - FIO_2}$$

$$- \frac{\dot{V}CO_2 \text{ bag} \times FIO_2}{1 - FIO_2} \text{ (ml/min)}$$

FIO₂: 吸気酸素濃度

FE_{O2}: 呼気酸素濃度

ガス分析器の delay time は、被験者により30回の測定を行い、その平均値を RM 300 に入力した。その値は、酸素・炭酸ガス それぞれ 1,865

msec・925 msec であった。 ΔTC は、酸素は 0~110 msec、炭酸ガスは 0~50 msec の範囲で設定値を入力し、測定した。被験者は、安静状態および足踏みによる運動負荷状態において、種々の $\dot{V}O_2$ ・ $\dot{V}CO_2$ での測定を行った。

ガス採取法に対する装置の誤差の算出には、次の式を用いた。

$$(1) \dot{V}E \text{ の誤差} = \frac{\dot{V}E - \dot{V}E \text{ bag}}{\dot{V}E \text{ bag}} \times 100 \text{ (%)}$$

$\dot{V}E$: 分時換気量

$$(2) \dot{V}CO_2 \text{ の誤差}$$

$$= \frac{\dot{V}CO_2 - \dot{V}CO_2 \text{ bag}}{\dot{V}CO_2 \text{ bag}} \times 100 \text{ (%)}$$

$$(3) \dot{V}O_2 \text{ の誤差}$$

$$= \frac{\dot{V}O_2 - \dot{V}O_2 \text{ bag}}{\dot{V}O_2 \text{ bag}} \times 100 \text{ (%)}$$

breath-by-breath 法による測定値とガス採取法での測定値および両者間の誤差の絶対値 (|誤差|) に対して検定を行った。統計量は平均土標準偏差で表わし、2方法間の相関は最小2乗法で求めた。また、 ΔTC を変動させた場合の各群間の有意差の検定には、分散分析およびDuncan multiple range test を用いた。

結果

breath-by-breath 法とガス採取法で求めた分時換気量は、 $y = -0.0961 + 0.9913 x, r = 0.997$ と高い相関を示し、|誤差|は $2.467 \pm 1.685\%$ であった(図3)。

ΔTC を変動させた場合の $\dot{V}O_2$ の|誤差|を、表1に示す。 ΔTC 80 msec において|誤差|が $3.89 \pm 1.75\%$ と最小となった。 ΔTC が 0 msec, 20 msec のそれと、 ΔTC 35~110 msec の各者の間に有意差を認めた($P < 0.01$)。また ΔTC 35 msec と ΔTC 50, 80 msec の両者の間に有意差を認めた($P < 0.05$)。

ΔTC 80 msec における $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}O_2$ bag は、 $y = 7.2722 + 0.9551 x, r = 0.9894$ と高い相関を示した(図4)。

ΔTC を変動させた場合の $\dot{V}CO_2$ の|誤差|を、表2に示す。 ΔTC 20 msec において|誤差|が $1.87 \pm 1.43\%$ と最小になった。 ΔTC 50 msec と ΔTC 15~40 msec の各者の間に有意差を認めた

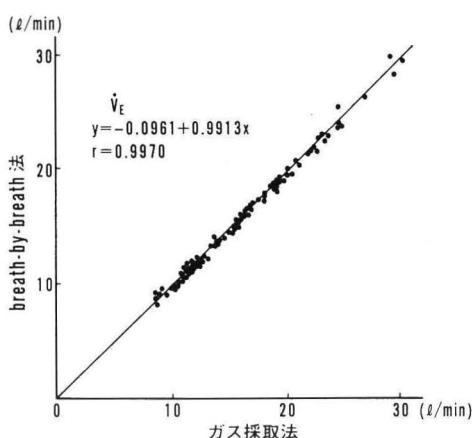


図 3 \dot{V}_E のガス採取法(X軸)と本装置を用いた方法(Y軸)の相関

表 1 Δ Time Constant 設定補正值の検討 (\dot{V}_O_2)

Δ TC (msec)	Number	誤差 (%) (m \pm SD)
0	9	23.71 \pm 3.94**
20	10	22.39 \pm 5.00**
35	17	9.32 \pm 4.80*
50	12	4.14 \pm 3.27
65	14	6.79 \pm 5.55
80	10	3.89 \pm 1.75
95	10	5.91 \pm 4.75
110	12	5.61 \pm 3.88

* Δ TC 50, 80 と有意差あり ($P < 0.05$)

** Δ TC 35, 50, 65, 80, 95, 110 と有意差あり ($P < 0.01$)

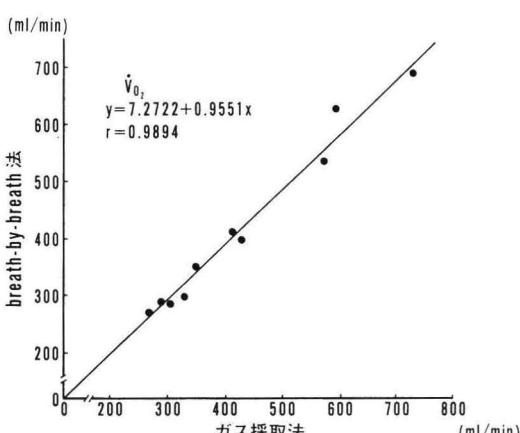


図 4 \dot{V}_O_2 の方法間の相関

表 2 Δ Time Constant 設定補正值の検討 ($\dot{V}CO_2$)

Δ TC (msec)	Number	誤差 (%) (m \pm SD)
0	9	4.54 \pm 2.27*
15	7	2.59 \pm 1.92
20	10	1.87 \pm 1.43
25	13	2.88 \pm 2.45
30	11	2.51 \pm 1.04
35	8	3.89 \pm 2.16
40	14	3.46 \pm 2.19
45	11	4.35 \pm 1.69
50	11	6.34 \pm 5.14**

* Δ TC 20 と有意差あり ($P < 0.05$)

** Δ TC 15, 20, 25, 30, 40 と有意差あり ($P < 0.05$)

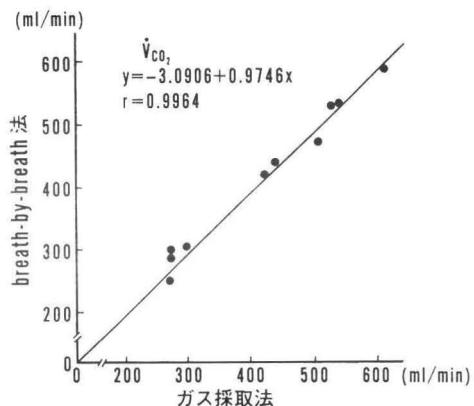


図 5 $\dot{V}CO_2$ の方法間の相関

($P < 0.05$)。また、 Δ TC 0 msec と Δ TC 20 msec の間に有意差を認めた ($P < 0.05$)。

Δ TC 20 msec における $\dot{V}CO_2$ と $\dot{V}CO_2$ bag は、 $y = -3.0906 + 0.9746x$, $r = 0.9964$ と高い相関を示した(図 5)。

考 察

Cardiocap と、RM 300 の組合せによる、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の連続測定の精度をガス採取法と比較した。 $\dot{V}O_2$ は Δ TC 80 msec, $\dot{V}CO_2$ は Δ TC 20 msec で |誤差|が最小となり、ほぼ傾き 1 の良好な直線関係が得られた。

麻酔中の $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ の測定は、半閉鎖回路で笑気などの可溶性不活性ガスの使用中では breath-by-breath の測定以外では理論的に難

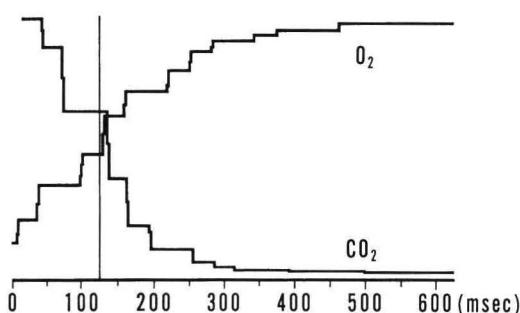


図 6 Cardiocap の dynamic response curve

しい。Heneghan らは mixing chamber 法に、不活性ガスを導入することによって、その測定に成功しているが、他の測定法との比較はされていない³⁾。従来より、breath-by-breath に吸・呼気ガス流量およびガス濃度を測定し、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ を算出する方法は多く報告されている^{1)4)~7)}が、ガス分析器として、質量分析計、あるいは酸素電極にジルコニウム電極を用いたものが使用されてきた。しかし、質量分析計は非常に高価であり、またジルコニウム電極は、揮発性麻酔薬の存在下では測定不可能である。今回、著者らの使用したガス分析器に使用されているパラマグネティック電極は、揮発性麻酔薬の存在下でも使用でき、また従来のものに比し、応答速度が速くなったため、breath-by-breath の測定に使用可能となったものである。著者らは、揮発性麻酔薬、笑気などの存在下での測定は行っていないが、Cardiocap の測定誤差は、それらの気体の存在下でも、±2% 以内とされている⁸⁾ので、今回の組合せによる麻酔中の $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ の測定は臨上有用なものであると考える。

ガス分析器の応答速度の補正に関しては、野口らの詳細な報告⁹⁾があるが、Cardiocap のように、応答速度の遅いものに関しては、野口らの方法では、S/N 比が大きくなると考えられる。また、図 6 で示したように Cardiocap の dynamic response curve は、A-D 変換後の信号出力の問題から smooth な曲線とならないため、Time constant の正確な測定が不可能である。以上の 2 点より著者らは、Area-mid-point 法¹⁾を採用した。当方法による補正は、野口らの方法における Lag time、

Time constant の両者を含んだ補正を行っていると考える。今回の結果では、delay time のみの補正 ($\Delta TC 0$) では、測定誤差が大きく、さらに加えて ΔTC による補正を必要とした。その理由は、図 6 よりわかるように、dynamic response curve が delay time の点を中心とした左右対称の curve となっていなかったため、 ΔTC による補正(一次補正)によって左右対称の curve に近づけることにより誤差が小さくなるものと考えられる。

Area-mid-point 法で Delay time と ΔTC の値を適当に設定することで、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ ともに良好な相関を示したことから、当方法による補正にても、高い精度の測定が可能であると考える。

結 語

- (1) パラマグネティック電極使用のガス分析器 (Cardiocap) と、レスピロモニター (RM 300) の組合せによる酸素消費量 ($\dot{V}O_2$)、炭酸ガス排泄量 ($\dot{V}CO_2$) の連続モニターの精度の測定を行った。
- (2) 両者の組合せにより測定した $\dot{V}O_2$ ・ $\dot{V}CO_2$ は、ガス集積法で測定したものと、高い相関を示した。 $\dot{V}O_2$; $y = 7.2722 + 0.9551 x$, $r = 0.9894$ (ΔTC 80 msec) $\dot{V}CO_2$; $y = -3.0906 + 0.9746 x$, $r = 0.9964$ (ΔTC 20 msec)
- (3) 両者の組合せによる $\dot{V}O_2$ ・ $\dot{V}CO_2$ の測定は、麻酔中の栄養・代謝のモニターとして有用であると考える。

文 献

- 1) Sue DY, Hansen JE, Blais M : Measurement and analysis of gas exchange during exercise using a programmable calculator. *J Appl Physiol : Respirat Environ Exerc Physiol* 49 : 456-461, 1980
- 2) Yoshiya I, Shimada Y, Tanaka K : Evaluation of a hot-wire respiratory flowmeter for clinical applicability. *J Appl Physiol : Respirat Environ Exerc Physiol* 47 : 1131-1135, 1979
- 3) Heneghan CPH, Gillbe CE, Branthwaite MA : Measurement of metabolic gas exchange during anaesthesia. A method using mass spectrometry. *Br J Anaesth* 53 : 73-76, 1981
- 4) Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ : On-line

- computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. *J Appl Physiol* 34 : 128-132, 1973
- 5) Pearce DH, Milhorn HT : Dynamic and steady-state respiratory responses to bicycle exercise. *J Appl Physiol : Respirat Environ Exercise Physiol* 42 : 959-967, 1977
- 6) Shimada Y, Yoshiya I, Hirata T, et al : Evaluation of a system for on-line analysis of VO_2 and VCO_2 for clinical applicability. *Anesthesiology* 61 : 311-314, 1984
- 7) Linnarson D, Lindborg B : Breath-by-breath measurement of respiratory gas exchange using on-line analog computation. *Scand J Clin Lab Invest* 34 : 219-224, 1974
- 8) Datex : Cardiocap operators manual. p 35, Doc. No. 873569, Finland, 1986
- 9) Noguchi H, Ogushi Y, Yoshiya I, et al : Breath-by-breath VCO_2 and VO_2 require compensation for transport delay and dynamic response. *J Appl Physiol : Respirat Environ Exercise Physiol* 52 : 79-84, 1982