

# 呼気 CO<sub>2</sub> 産生量の連続測定による呼吸異常， 循環異常の解析

小野 紫\*，大川一美\*，唐澤正弥\*  
赤地 吏\*\*，岡田和夫\*

## 要 旨

呼気 CO<sub>2</sub> 濃度と呼吸流速を刻々と測定する Ventrak 1000 を使用して，帝京大学中央手術部での手術患者で呼気 CO<sub>2</sub> 産生量を連続的に測定した。一回換気量，肺コンプライアンス，気道抵抗などの換気力学の他に Single Breath Carbon Dioxide (SBCO) として死腔量，死腔率，A-a DCO<sub>2</sub>，呼気 CO<sub>2</sub> 排泄量が測定できる。肺循環の増減，心拍出量の増減により末梢から肺に運ばれる CO<sub>2</sub> 量，さらには肺から排出される CO<sub>2</sub> 量が変わってくることをみた。出血性ショックでは  $\dot{V}CO_2$  の減少，褐色細胞腫では  $\dot{V}CO_2$  の上昇が心拍出量増加，血圧上昇と共にみられた。

換気量が異常に低下した状態が，麻酔科医がバイタルサインの変動からでは判断できなかったときに Ventrak により  $\dot{V}CO_2$  低下，呼気 CO<sub>2</sub> 上昇が認められ，一回換気量の低下の結果をよく示した。周術期のモニターとして呼吸，循環の両面で有用であると考察した。

## はじめに

ショックでは組織への酸素供給 ( $\dot{D}O_2$ ) が減少して，このため組織での酸素消費量 ( $\dot{V}O_2$ ) が減少してくる。生体は末梢への酸素供給が減少しても，あるレベルまでは生体の代償機構が働いて  $\dot{V}O_2$  は低下せず一定範囲に留まる。しかしこの critical point を越えて  $\dot{D}O_2$  が低下すると  $\dot{D}O_2$  減少の度合いに応じて  $\dot{V}O_2$  も低下してくるが， $\dot{V}CO_2$

は測定が容易でないので呼気 CO<sub>2</sub> 濃度で代用しようとする考えがある。これが最も応用されたのは心停止時及びこれから離脱する蘇生の有効性の判定のためのモニターとしての呼気 CO<sub>2</sub> 濃度測定である。

筆者らは，呼気 CO<sub>2</sub> 濃度だけでなく呼気  $\dot{V}CO_2$  を非侵襲的に測定する器械が開発され，呼吸のモニターとして応用されるのに注目して，これが呼吸だけでなく循環器系のモニターになることを体験したので報告する。

## 方 法

測定原理と機器の構成を示す。

Ventrak 1000 (Novamatrix 社) を用いた。これは呼気 CO<sub>2</sub> 濃度測定のために赤外線分析法を用い，これに流速測定が加わる。流速は気速計 (pneumotachography) を用いるが，流速 1.8 ~ 180 l/分の範囲で直線性が確かめられ，ガス組成の影響も受けない fixed orifice の差圧計 (differential pressure transducer) を使用している。この流速を積分して換気量が測定される。

呼気 CO<sub>2</sub> 濃度検知センサーは回路内にあり，“main stream”方式で濃度変化測定が遅れが生じないようにしている。

図 1 は  $\dot{V}CO_2$  (呼気) の測定の情報入力を示す。図 2 は Fletcher の方法で横軸に換気量，縦軸に呼気 CO<sub>2</sub> 濃度を取り，呼気開始から終了までの呼気 CO<sub>2</sub> 呼出曲線を描く<sup>1)</sup>。この曲線と横軸とで囲まれる部分の面積が一呼吸により呼出される CO<sub>2</sub> 量を示す。一分間にわたり加算して  $\dot{V}CO_2$  (分時 CO<sub>2</sub> 排泄量) が求められる。本器はこの測定で求められた  $\dot{V}CO_2$  値を刻々と連続的に横軸を時間

\* 帝京大学医学部麻酔科学教室

\*\* 同 附属病院 ME 部

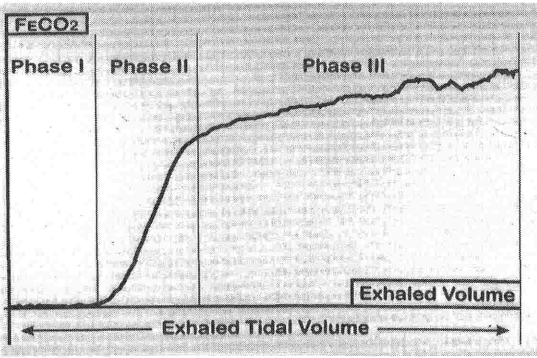


図1 Ventrak の  $\dot{V}_{CO_2}$  測定法

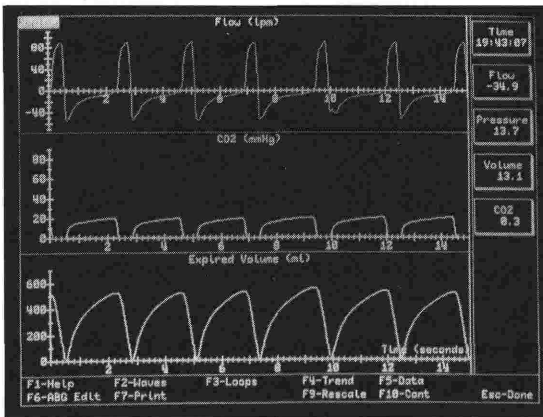


図2 流速 (Flow), 換気量 (Tidal Volume)  $ETCO_2$  (End-Tidal  $CO_2$ ) の実測曲線

軸としてディスプレイしてくれる。

対象は帝京大病院中央手術部の手術患者であるが、この中で術中呼吸、循環の異常に遭遇した3症例について検討した。

症例1：(心拍出量増加例) 48歳 女性 褐色細胞腫、副腎摘出術。バルビツレート、ベクロニウムにより導入、亜酸化窒素-酸素-セボフルランで人工呼吸下で維持した。呼吸モニターとしてVentrakを使用した。他に観血的血圧、中心静脈圧、熱希釈法による連続心拍出量測定を行った。全経過を通じて手術操作による出血への対策、副腎操作時の血圧上昇、頻脈対策、腫瘍摘出後の低血圧に対するカテコラミン投与などに配慮した。術後は救命センターで呼吸、循環管理を厳重に行い順調に推移した。

症例2：(出血ショック例) 63歳 女性 骨盤

腫瘍、骨盤内臓器全摘術。手術室入室後、広範な手術で出血が先行した。Ventrak、血圧、パルスオキシメーターのモニターにより監視しながら、プロポフォル、ベクロニウムによる導入、亜酸化窒素-酸素-セボフルランにより人工呼吸下に維持した。術中の出血量が7000 mlに及び、輸血、輸液で対処したが低血圧の状態が続いた。手術終了近くになると輸血が追いつき安定した循環動態に回復できた。術後の経過は順調であった。

症例3：(呼吸抑制例) 68歳 男性。消化管イレウス、試験開腹。心筋梗塞でACバイパスの手術歴あり。イレウスによる脱水、感染症状態で緊急手術。術中出血多量で輸血、輸液も対応が遅れがちであった。導入はバルビツレート、ベクロニウムで、維持は亜酸化窒素-酸素-イソフルランで人工呼吸を行った。術中血圧、尿量、Ventrakモニターを行ったが血圧は比較的安定して術終了時を迎えた。人工呼吸を中止して自発呼吸に放置したが、患者の呼吸を充分と考えて補助呼吸を行わずにいた。呼吸は正常とみられたが、Ventrakの換気諸値が異常となり人工呼吸を再度開始し、状態が落ち着いた後人工呼吸のまま救命センターに戻った。術後は人工呼吸下に管理したが呼吸、循環動態は特に問題なく経過した。

## 結 果

症例1：Ventrakの成績と手術経過を示す。図3は麻酔記録用紙であるが、血圧が手術開始後、副腎摘出のための手術操作により血圧上昇、頻脈(70 bpm→130 bpm)がみられ、心拍出量も9 lと上昇した。ここでは血管拡張剤(ミリスロール、ATP)などで正常化が図られている。腫瘍摘出後は急速輸液、カテコラミン点滴を行って血圧の回復をはかった。図4はこの間のVentrakの記録であるが、心拍出量の増減との相関がよくみられる。図5は換気量、呼気 $CO_2$ 濃度、 $\dot{V}_{CO_2}$ の経時的变化であるが、換気量は一定で呼気 $CO_2$ 濃度、 $\dot{V}_{CO_2}$ が心拍出量の増減、血圧の増減につれて変動している。手術による腫瘍操作のためカテコラミン放出を来し、血圧上昇、心拍出量増大がみられる。麻酔開始時に比べ $\dot{V}_{CO_2}$ は70 mlから140 mlのレベルに上昇している。手術による摘出により心拍出量が減少すると、 $\dot{V}_{CO_2}$ は140 mlから95 mlにと急激に低下している。手術終了時には、ほぼ回復

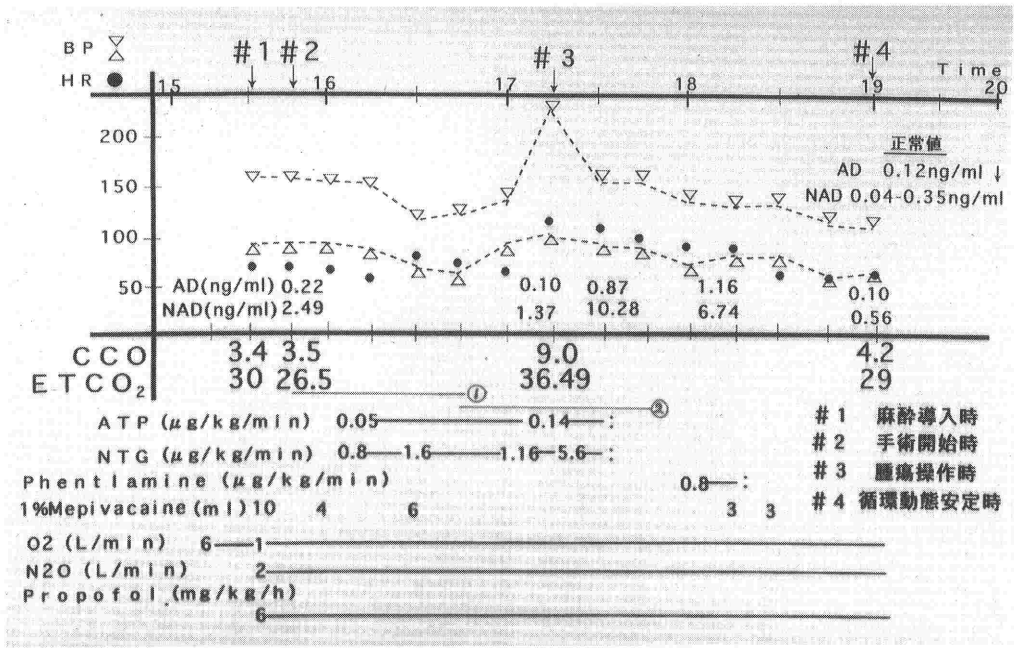


図3 麻酔経過 (症例1) : CCO, 連続心拍出量; ETco<sub>2</sub>, 呼気CO<sub>2</sub>濃度

	麻酔導入後	手術開始時	腫瘍操作時	循環動態安定時
$\dot{V}CO_2$ (ml)	113	99	147	117
VD/VT	0.40	0.31	0.30	0.36
ETCO <sub>2</sub> (mmHg)	30.0	26.5	36.5	32.0
PaCO <sub>2</sub> (mmHg)	37.9	29.0	42.2	37.9
A-aDCO <sub>2</sub>	7.9	2.5	5.7	5.9
CO (l/min)	3.4	3.5	9.0	4.2

図4  $\dot{V}CO_2$ , ETCO<sub>2</sub>, CO (心拍出量) の関係 (症例1)

して正常値に近い値となった。

症例2は手術開始から $\dot{V}CO_2$ は正常より低下した状態であるが、図6, 7に $\dot{V}CO_2$ , 呼気CO<sub>2</sub>濃度, 換気量の時間的推移を表す。出血が先行して血圧, 心拍出量が低下した状態が続いているが、 $\dot{V}CO_2$ は80mlと正常よりかなり低下した状態が続いている。呼気CO<sub>2</sub>濃度も当初より低下したままである。手術終了に近づくとう輸血が間にあって血圧の回復につれて $\dot{V}CO_2$ が正常に近づいている。

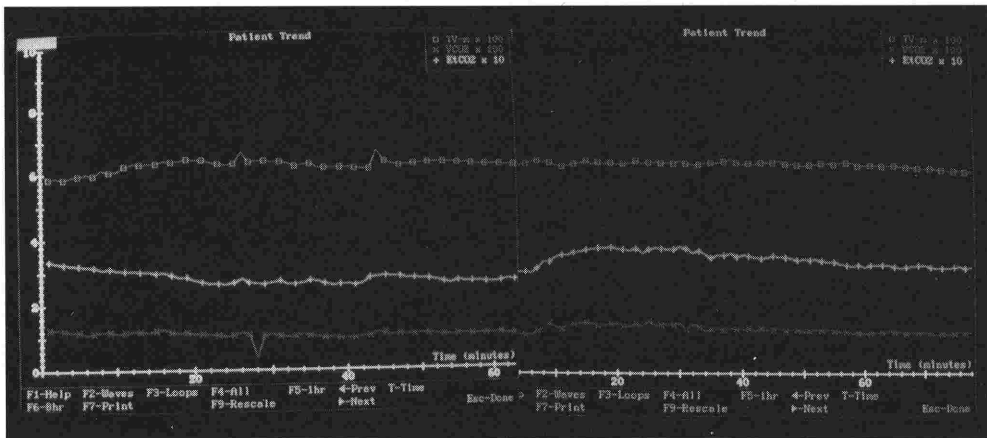


図5 換気量 (□),  $\dot{V}CO_2$  (×), ETCO<sub>2</sub> (+) の計時的変化 (症例1)

症例3は手術中の出血の変動がかなり見られるが、 $\dot{V}CO_2$ , 呼気  $CO_2$  濃度は比較的安定している。

手術の終了時に人工呼吸を中止して自発呼吸にまかせ、バッグの動きが充分と考えて、術中のベクロニウム使用に対してネオスチグミンによる拮抗を行わなかった。15分経過した時に血液ガス測定を行って pH 6.9,  $PCO_2$  100 mmHg 以上,  $PO_2$  150 mmHg という値を認めて人工呼吸を再開した。この間に  $\dot{V}CO_2$  は著減し, 呼気  $CO_2$  濃度は急激な上昇を示しているが, 換気量減少が同時に認められる。人工呼吸の再開に伴って  $\dot{V}CO_2$  増加, 呼気  $CO_2$  の 100 mmHg からの低下が見られる (換気量は正常レベル)。みかけの自発呼吸が不十分で肺胞低換気が著明になることがこの間にモニターした図8からよくうかがえる。

Patient: NAKAMURA HISAKO	ID: 673-533-2				
Date	03/24/97	03/24/97	03/24/97	03/24/97	
Time	09:37:29	10:40:38	11:31:22	12:46:08	
$PCO_2$ (mmHg)	43.8	45.7			
pH	7.23	7.20			
$HCO_3^-$ (mEq)	22.4	21.7			
O <sub>2</sub> Sat (%)	99.9	99.9			
Base Excess	-3.3	-4.7			
O <sub>2</sub> Content (Vol%)	22.1	21.7			
<b>SBDE Parameters</b>					
Minute Ventilation - Total (L)	3.165	4.839	4.153	3.695	
Minute Ventilation - Alve (L)	2.330	3.019	3.193	3.120	
Frequency (/min)	8	11	11	9	
Tidal Volume - Spont (ml)	0.0	0.0	0.0	0.0	
Tidal Volume - Mech (ml)	395.3	366.7	376.9	432.1	
Tidal Volume - Alve (ml)	286.6	286.1	321.5	319.2	
Dead Space - Airway (ml)	92.00	95.30	83.70	81.10	
Dead Space - Phys (ml)	163.42	171.26			
Dead Space - Alve (ml)	71.42	75.96			
UB-VT Airway	0.24	0.25	0.21	0.20	
UB-VT Phys	0.41	0.47			
$CO_2$ Production (ml/min)	67.0	79.4	85.9	82.8	
Mixed Expired $CO_2$ (mmHg)	25.71	24.38	25.12	24.73	
End Tidal $CO_2$ (mmHg)	38.50	36.00	36.00	35.00	

図6 症例2の  $\dot{V}CO_2$ ,  $ETCO_2$ , VTの変化 (1)

Patient: NAKAMURA HISAKO	ID: 673-533-2				
Date	03/24/97	03/24/97	03/24/97	03/24/97	
Time	15:55:51	16:53:53	17:47:31	18:50:24	
$PCO_2$ (mmHg)	39.1	46.0	43.1	42.7	
pH	7.62	7.29	7.35	7.47	
$HCO_3^-$ (mEq)	21.9	22.9	23.4	23.9	
O <sub>2</sub> Sat (%)	99.9	99.9	99.9	99.9	
Base Excess	-2.6	-3.2	-1.8	-1.0	
O <sub>2</sub> Content (Vol%)		21.8			
<b>SBDE Parameters</b>					
Minute Ventilation - Total (L)	5.466	4.859	5.025	5.331	
Minute Ventilation - Alve (L)	4.294	3.687	3.977	4.458	
Frequency (/min)	11	11	11	11	
Tidal Volume - Spont (ml)	0.0	0.0	0.0	0.0	
Tidal Volume - Mech (ml)	496.2	448.4	456.2	483.3	
Tidal Volume - Alve (ml)	391.0	342.0	334.3	396.3	
Tidal Volume - Phys (ml)	111.20	88.20	83.70	79.00	
Dead Space - Airway (ml)	237.53	190.87	210.34	220.18	
Dead Space - Phys (ml)	126.33	102.67	126.64	141.18	
Dead Space - Alve (ml)	0.22	0.21	0.20	0.17	
UB-VT Airway	0.48	0.43	0.46	0.45	
UB-VT Phys	95.1	106.1	99.4	109.9	
$CO_2$ Production (ml/min)	28.41	26.12	23.25	23.30	
Mixed Expired $CO_2$ (mmHg)	28.00	30.00	34.50	32.00	

図7 症例2の  $\dot{V}CO_2$ ,  $ETCO_2$ , VTの変化 (2)

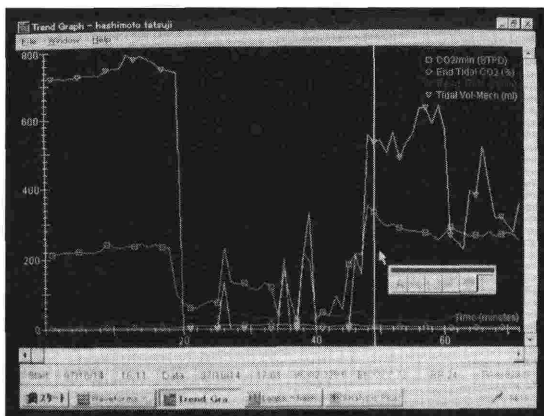


図8 症例3の  $\dot{V}CO_2$ (□),  $ETCO_2$ (○), 一回換気量(▽)の関係

考 察

呼気  $CO_2$  濃度は今日では呼吸モニターとして麻酔, 集中治療, 救急医療でルーチンに应用されている。呼気  $CO_2$  で肺胞換気量, 死腔換気を評価できる<sup>3)</sup>。以前から当教室では呼気  $CO_2$  濃度だけでなく呼気  $CO_2$  排泄量 ( $\dot{V}CO_2$ ), 酸素摂取量を質量分析計と流速計の組合せで測定していた<sup>2)</sup>。しかし測定法が煩雑で臨床応用までに広がらなかった。また間接熱量計 (Deltatrac Metabolic Monitor) で  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  を測定できるが<sup>4,5)</sup>、これは連続測定ができず、また精度, 再現性で問題がある。これに対し今回使用した Ventrak は呼気  $CO_2$  濃度測定が正確で連続的に行え, 流速 (flow), 流量 (volume) の測定も正確に行える。またこの2者からの  $\dot{V}CO_2$  の積算はコンピューターで行える。

この  $\dot{V}CO_2$  は従来は呼気管理の指標として应用されているが, 肺循環の良否の良い指標になることも注目され, 心停止時の呼気  $CO_2$  濃度の低下と蘇生による回復が報告されている<sup>6,7)</sup>。しかし循環の極度に低下したショックに関しては, 呼気  $CO_2$  濃度が心拍出量の低下につれて低下することを Guzman らが報告しているのみである<sup>8)</sup>。 $\dot{V}CO_2$  に関しては測定法が確立されず, 少数の報告しかなかった<sup>2-4)</sup>。ここで廉価で非侵襲的な器械が導入され, 呼吸だけでなく循環, 代謝の変動が刻々と計測できる方法を手の中にする事は, 画期的なことといえる。症例では心拍出量増加により,  $\dot{V}CO_2$  の増加をみたのであるが, 換気量が一定に維持されている場合, 心拍出量が正常以上になると  $\dot{V}CO_2$  が上昇してくることが示されたが,

代謝が変わらないとすると組織からの CO<sub>2</sub> の洗い出し, 肺循環に運ばれる CO<sub>2</sub> 量が増加したことが示されると考えられる. 心拍出量増加の時間がある限界を超えれば  $\dot{V}CO_2$  は変化するが, 心拍出量正常化につれて  $\dot{V}CO_2$  は正常範囲に収れんしてくる.

症例 2 は, 人工呼吸で換気が一定の状態での低血圧, 心拍出量低下により肺からの CO<sub>2</sub> 排泄が低下した状態で  $\dot{V}CO_2$  が減少している. Guzman らが組織低灌流での呼気 CO<sub>2</sub> 濃度の低下を  $\dot{V}CO_2$  について臨床で確認した成績である<sup>7)</sup>. 呼吸が一定であれば循環異常の発生が  $\dot{V}CO_2$  でモニターできることが示されたことになる<sup>8-10)</sup>. 組織低灌流による嫌気性代謝の亢進, 乳酸産生の影響が続くと CO<sub>2</sub> 産生が余分にみられるが, これはショックでの組織レベルでの CO<sub>2</sub> 産生量, O<sub>2</sub> 消費量についての検討を待たねばならない. これは重症ショックでの血液ガス, 殊に BE の変動, 混合静脈血 O<sub>2</sub> 含量, 血液乳酸値との関連の検討が大切になる. 呼吸商 (RQ) を対比することも興味ある点である<sup>11)</sup>.

症例 3 は肺胞換気量, 呼気 CO<sub>2</sub> 濃度に関する肺胞式で従来呼吸の良否をみていたのを,  $\dot{V}CO_2$ /肺胞換気量 $\propto$ 呼気 CO<sub>2</sub> 濃度の式で肺胞換気量が呼気 CO<sub>2</sub> 濃度に反比例するが, ここでの  $\dot{V}CO_2$  は末梢組織での産生量である. しかしこれを呼気 CO<sub>2</sub> 排泄量と考えると, 呼気 CO<sub>2</sub> 濃度が肺胞低換気で上昇しても, 呼気 CO<sub>2</sub> 排泄量は低下してくる状況が測定できたことになる. 本モニターで自発呼吸に放置すると一回換気量の低下とともに死腔率の上昇, 肺胞換気量の低下がきて, 同時に呼気 CO<sub>2</sub> 排泄量の低下, 呼気 CO<sub>2</sub> 濃度の低下がみられる. より換気動態がダイナミックにみられるし, CO<sub>2</sub> の体内蓄積の状態もわかる.

## ま と め

呼気 CO<sub>2</sub> 濃度と  $\dot{V}CO_2$  を同時測定できる Vent-

rak により手術患者で呼吸, 循環異常をモニターした. 一定換気で心拍出量が増加すると  $\dot{V}CO_2$  が増加し, 心拍出量が減少すると  $\dot{V}CO_2$  が低下してきた. 従来呼吸のモニターとして使用されていたが, 呼吸抑制を人工呼吸に切り替えて危機を脱した症例を経験した.  $\dot{V}CO_2$ , 呼気 CO<sub>2</sub> 濃度を測定することでより呼吸動態を定量化して管理することができた.

将来幅広い臨床応用が期待できる Ventrak を用いて症例を 3 例まとめた.

## 文 献

- 1) Fletcher R: The single breath test for carbon dioxide, Lund, Sweden, 1980
- 2) 岡田和夫, 小杉 功, 山口佳晴ら: 重症呼吸疾患患者の管理のシステム化—主に人工呼吸管理の試み—. 日本胸部疾患学会誌 14: 711-721, 1976
- 3) Stock MC: Capnography for adults. Crit Care Clin 11: 219-232, 1995
- 4) 大竹善雄, 平澤博之: ICU, MOF 患者の間接熱量測定法の有用性. JJPEN 14: 529, 1992
- 5) 七戸康夫, 升田好樹, 高橋玄巳ら: 硬膜外麻酔・脊髄麻酔中の  $VO_2$ ,  $VCO_2$  の変化—Indirect calorimetry による検討, 麻酔 42: 1470-1476, 1993
- 6) Falk JL, Rackow EC, Weil MH: End-tidal carbon dioxide concentration during cardiopulmonary resuscitation. N Engl J Med 318: 607-611, 1988
- 7) Gudipati CV, Weil MH, Bisera J, et al: Expired carbon dioxide: a noninvasive monitor of cardiopulmonary resuscitation. Circulation 77: 234-239, 1988
- 8) Guzman SA, Lacombe FJ, Najjar A, et al: End-tidal partial pressure of carbon dioxide as a noninvasive indicator of systemic oxygen supply dependency during hemorrhagic shock and resuscitation. Shock 8: 427-431, 1977
- 9) Weil MH, Bisera J, Trevino RP, et al: Cardiac output and end-tidal carbon dioxide. Crit Care Med 13: 907-909, 1985
- 10) Omato JP, Garnett AR, Glauser FL: Relationship between cardiac output and the end-tidal carbon dioxide tension. Am Emerg Med 19: 1104-1106, 1990
- 11) Schumacker PT, Cain SH: The concept of a critical oxygen delivery. Intensive Care Med 13: 910-911, 1985

## Analysis of Ventilation or Pulmonary Perfusion Abnormality with Continuous Expired CO<sub>2</sub> Production

Yukari Ono\*, Kazumi Okawa\*, Masaya Karasawa\*, Tsukasa Akachi\*\*, Kazuo Okada\*

\*Department of Anesthesiology and \*\*Medical Engineering,  
Teikyo University School of Medicine, Tokyo, Japan

CO<sub>2</sub> production from the lung was calculated with Fletcher's method. Ventrak is designed to measure and calculate breath by breath expired CO<sub>2</sub> production with this method. Our initial experience with this Ventrak indicates that this device can reliably provide on-line CO<sub>2</sub> production. On respiratory failure CO<sub>2</sub> production was decreased and end-tidal CO<sub>2</sub> was increased simultaneously, while tidal volume and minute volume were significantly decreased. These

changes were clearly monitored with Ventrak, while anesthesiologists could not remark the decrease of alveolar ventilation. Changes of cardiac output contributed to the increase or decrease of expired CO<sub>2</sub> production, which was clearly shown both in hemorrhagic shock and pheochromocytoma. This Ventrak may provide a noninvasive on-line information of ventilation and pulmonary circulation.

Key words : CO<sub>2</sub> production, Expired CO<sub>2</sub> curve, Expired flow rate, Hemorrhage, Pheochromocytoma

(Circ Cont 19 : 255~260, 1998)