

□原 著□

標準ガスと臨床例による呼気炭酸ガス分析器の比較

宮地 哲也* 謝 宗 安** 大村 昭人**

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine the accuracy of four capnometers by using two premixed dry standard carbon dioxide gases (5% CO₂ in oxygen and 9.8% CO₂ in oxygen) and to evaluate their performance in patients undergoing laparoscopic cholecystectomy.

Capnometers studied were two infrared analyzers (Novametrix 7000, Datex Capnomac), a Raman spectrometer (Rascal) and a photoacoustic spectrometer (Brue Kjaer 1304). Brue Kjaer is designed to display the PCO₂ of a gas which is internally calculated as FCO₂ × (PB-47) where PB is barometric pressure and the PCO₂ readings of the standard gases in the present study were in the close proximity of the PCO₂ values of the standard gases calculated as FCO₂ × (PB-47). Other three capnometers showed the PCO₂ readings exceeding the values of the standard gases calculated as FCO₂ × PB by 1.9–2.6 mmHg for 5% gas and 4.1–6.8 mmHg for the 9.8% gas. This suggests that these three capnometers use the equation, FCO₂ × PB for the calculation of PCO₂.

Arterial end-tidal CO₂ difference, a_{ET}PCO₂ was negative in 6–16% of measurements using Rascal, Capnomac and Novametrix, whereas Brue Kjaer did not show any negative data.

In conclusion, although all four capnometers studied proved to function reasonably well in the clinical setting, the capnometers which calculate the PCO₂ of a sample gas using the FCO₂ × PB equation may give us higher than actual PCO₂ values and may provide us the false negative value of a_{ET}PCO₂.

最近呼気炭酸ガス測定機器（カプノメータ）は、各種市販され、その有用性は高く評価されている^{1)~4)}。そこでわれわれは2種類の標準ガスを用いて、4種のカプノメータの精度を比較検討し、また腹腔鏡下胆囊摘出術における4種カプノメータの有用性を検討したので報告する。

対象と方法

1) 標準ガスによる検定

実験には標準ガスを2種類用いた。その組成は、ガス1がCO₂:5%, O₂:35%, N₂O:60%で、ガス2はCO₂:9.8%, O₂:30.2%, N₂O:60%であった。

4種のカプノメータは、RASCAL ANESTHESIA/RESPIRATORYGAS. MONITOR (AL-

BION INC, 以下ラスカル), ANESTHETIC MONITOR. TYPE 1304 (Brue & Kjaer INC, 以下ブリュエルケア), NOVAMETRIX 7000 (NOVAMETRIX MEDICAL SYSTEM INC, 以下ノバメトリックス), CAPNOMAC (DATEX INC, 以下カプノマック) の各種カプノメータを使用した。

各カプノメータの原理は、ラスカルがラマン散乱法、ブリュエルケアは光音響分光法、ノバメトリックスとカプノマックは赤外線吸収法で、またノバメトリックスは、メインストリーム型、他の3種は、サイドストリーム型であり、タイプの異なるこれら4種類を選んだ。ガスサンプルはカプノマックとブリュエルケアではナフィオンチューブを用い、ラスカルでは専用チューブを用いた。

各機器の較正は、ラスカルとブリュエルケア

* 帝京大学医学部附属溝口病院ME科

** 帝京大学医学部附属溝口病院麻酔科

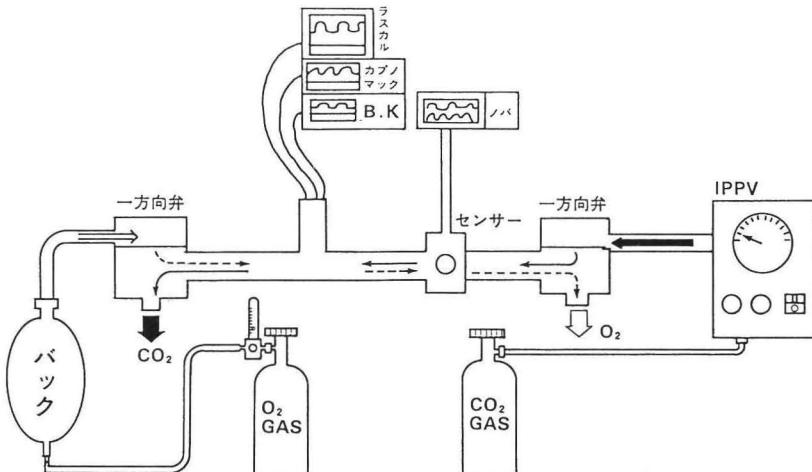
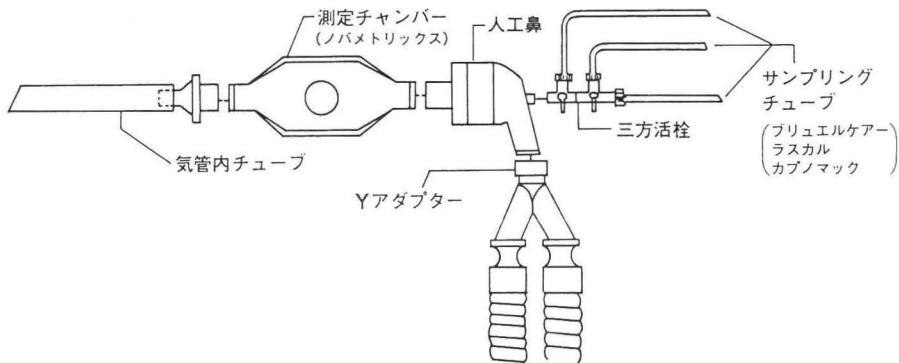


図 1 標準ガス実験の模式図

図 2 臨床例の呼気 CO₂ 測定

は、3~6カ月に1回行い、カブノマックとノバメトリックスは使用前に必ず行った。特にカブノマックは、専用キャリブレーションガスにより毎回較正を行った。

図1のように標準ガスを乾燥したまま人工呼吸器から換気量500ml、換気回数10回/分のIPPVでガスを流し、他方から100% O₂ガスを交互に流した実験を、3回大気圧の異なる(762, 752, 760mmHg)日に計8回行った。100%飽和水蒸気の標準ガスを使用しなかった理由はカブノメータ測定チャンバーでの水蒸気や水滴による測定誤差を避けるためであった。

2) 臨床研究

腹腔鏡下胆囊摘出術を受ける、ASA I~IIの患者30名を対象とし、4種カブノメータの有用

性および精度を検討した。

平均年齢52±13歳(平均±SD)、身長163±11cm、体重59±10kgであった。全例とも気管内挿管後、酸素、笑氣、イソフルレン、筋弛緩薬を投与し調節呼吸とした。1回換気量10~12ml/kg、呼吸回数10~12回/分とし、術中は換気量を一定とした。

呼気炭酸ガスの測定は、図2のように気管内チューブの口側端にメインストリーム型の測定チャンバーを取付けたのち人工鼻を接続し次にサイドストリーム型のサンプリングチューブをつなぎ測定を行った。

炭酸ガス気腹により高炭酸ガス血症になるのを防ぐためにPaco₂は、気腹前値が25~35mmHgとなるようにした。炭酸ガス気腹前、気

表 1 標準ガスとカプノメータ測定結果

標準ガス	5% CO ₂	9.8% CO ₂
大気圧×F _{CO₂}	37.9±0.3	74.3±0.5
ラスカル	40.1±2.3	78.4±3.9
ノバメトリックス	40.5±2.3	81.1±3.8
カプノマック	39.8±1.2	81.0±2.8
(大気圧-47)×F _{CO₂}	35.6±0.3	69.7±0.5
ブリュエルケア	35.9±0.9	70.5±1.6

n=8, 単位 mmHg (Mean, ±SD)

腹3分, 5分, 10分, 15分, 30分, 60分に動脈血ガスと終末呼気CO₂分圧の測定を行った。また、全測定30例中2例では、① 98.5% O₂と1.5% イソフルレン、② 60% 笑気と38.5% O₂と1.5% イソフルレンの混合ガスを交互に流し、カプノメータの笑気による影響を調べた。

結 果

1) 標準ガスによる検定

標準乾燥ガスを測定した結果を表1に示す。5% CO₂ 標準ガスは大気圧×5/100で計算され37.9±0.3 mmHg (平均±SD), 9.8% CO₂ ガスは74.3±0.5 mmHgとなる。SDは大気圧が3日異なったことから導かれた。ラスカル、カプノマック、ノバメトリックスの測定値はいずれもこの計算値より高く、5% では1.9~2.6 mmHg, 9.8% では4.1~6.8 mmHgも高かった。一方ブリュエルケアは37°Cの飽和水蒸気圧である47 mmHgを大気圧から引いたものにF_{CO₂}を乗じた値である5% CO₂ の35.6±0.3 mmHg, 9.8% の69.7±0.5 mmHgに極めて近い値である35.9±0.9 mmHgと70.5±1.6 mmHgを示した。

機種間の最大差は5% CO₂ ガスで4.6 mmHg, 9.8% CO₂ ガスでは10.6 mmHgであった。

2) 臨床研究

炭酸ガス気腹とともにP_{ACO₂}やP_{ETCO₂}は上昇し、最高で平均9 mmHg増加した。4機種のカプノメータと動脈血との差は、図3に示すように、ブリュエルケアが最も大きく、気腹中は全

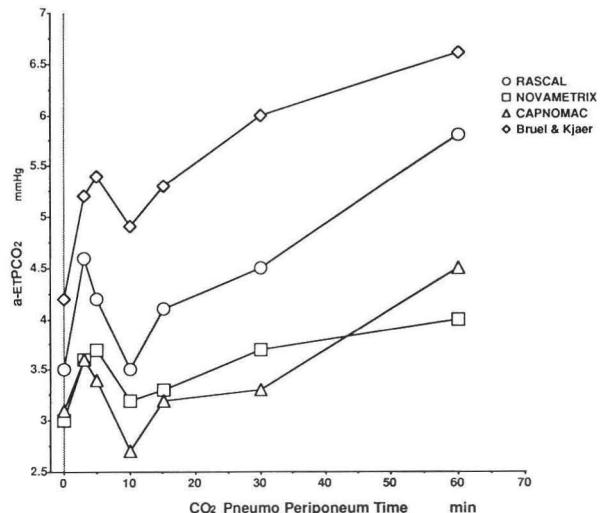


図3 動脈血からの平均値

表2 P_{ETCO₂}がP_{ACO₂}より高値を示した人数と例数

カプノメータ	人 数	例数/全測定回数
ラスカル	7/30	20/208回
カプノマック	13/30	28/208回
ノバメトリックス	14/30	13/203回
ブリュエル・ケア	0/30	0/209回

測定にわたり、ブリュエルケアは他の3種のカプノメータと有意差があった (P<0.02)。

P_{ETCO₂}の方が動脈血より大きな値を示す人数と例数は、表2に示すように、カプノマックやノバメトリックスでは約半数の患者に見られ、全測定回数からみると6.5~13.5%に発生し、ラスカルでは9.6%発生した。しかし、ブリュエルケアでは、1例も発生しなかった。

笑気による影響は、ラスカル、ブリュエルケア、カプノマックは、自動補正のため問題ないが、手動補正であるノバメトリックスは、60%笑気を使用していて無補正にしたとき、P_{ETCO₂}が6~8 mmHg高く表示された。

考 察

臨床研究において炭酸ガス気腹時間が経過するにつれP_{ACO₂}が上昇し、それに伴いP_{ETCO₂}も

上昇し、その差 $a_{\text{ET}}\text{PCO}_2$ は気腹時間が 60 分以内では変化しなかった。したがってカプノメータは、 P_{ETCO_2} を観察することにより Paco_2 が推定でき、有用な指標であることがわかった。

P_{ETCO_2} と Paco_2 との間に解離が生ずる原因には、患者の呼吸や循環の変化、血液ガス分析器のエラーなどさまざまな因子がある。しかし、カプノメータの精度そのものも当然重要な因子と考えられる。

カプノメータの機種間の差は、臨床例で正常 Paco_2 範囲では、2~2.5 mmHg 内であり、5% 標準 CO_2 ガスでは、4.6 mmHg 内であった。

最も大きな誤差を生じたのは、笑気補正装置を有する機器で無補正にしたときであった。この誤差は笑気分子が炭酸ガス分子に衝突し、炭酸ガスの吸収スペクトルを広げる効果 (collision effect)²⁾ などにより生じ、これは赤外線吸収法の欠点の 1 つである。この結果は、Raemer⁵⁾ の報告とよく一致した。

今回用いた 4 種類のカプノメータは、いずれも臨床上用いるのに良好な成績を示したが、4 機種間の差を生じた原因は、① 分圧測定において、大気圧から水蒸気圧の補正の有無、② 機器の精度、③ ナフュオンチューブの使用の有無などが考えられる。

Severinghaus⁶⁾ が指摘しているように肺内では $P_{\text{ETCO}_2} = F_{\text{ETCO}_2} \times (\text{大気圧} - 47)$ が正しい値であり、水蒸気補正をしていない機種ではユーザーが補正する必要がある。この補正を行わないと正常 PCO_2 レベルで 2.5 mmHg 程度の誤差を生じる。動脈血終末呼気炭酸ガス分圧較差 $a_{\text{ET}}\text{PCO}_2$ が赤外線吸収法の機器でしばしば逆転するのは、この測定法の誤差が 2 mmHg と比較的大きいこと²⁾ のほか、笑気補正が十分に行われなかつたことや P_{ETCO_2} が $F_{\text{ETCO}_2} \times \text{大気圧}$ より計算されることが大きな原因である。From⁷⁾ は赤外線吸収法カプノメータ 6 種を比較し 12 mmHg の差をみており、機種間の差が大きいことを指摘している。人工呼吸中や麻酔中での $a_{\text{ET}}\text{PCO}_2$ は心肺機能が正常患者で 3~6 mmHg⁸⁾ と報告されており、 P_{ETCO_2} を $F_{\text{ETCO}_2} \times (\text{大気圧} - 47)$ から求めかかるかぎり $a_{\text{ET}}\text{PCO}_2$ が負になることは無麻酔自発

呼吸下で呼気時間が長いときなど⁸⁾ 特殊な条件下しか起こり得ないと考えられる。ナフィオンチューブは水滴による誤差を解消し、より正確な測定をもたらす。標準ガスを用いた比較において、ブリュエルケアが $F_{\text{CO}_2} \times (\text{大気圧} - 47)$ に最も近い値を示したこと、臨床例でブリュエルケアが $a_{\text{ET}}\text{PCO}_2$ 値が最も大きく、逆転減少が一番少なかった事実は、臨床での現象をより正確に反映しているものと考えられる。

以上のことよりカプノメータを使用する際には、1) キャリプレーションを正しく行う。2) Paco_2 との比較を行う。3) 機種の特徴を良く知っておく。4) $a_{\text{ET}}\text{PCO}_2$ が拡大縮小する原因がないか検索する、ことを注意し使用することが大切である。

使用した 4 種カプノミータの利点と欠点を、比較してみると表 3 のようである。ラスカル、カプノマック、ブリュエルケアは、麻酔ガスモニタが可能で、ラスカルとブリュエルケアはハロセシ、エンフルレン、イソフルレン、セボフルレンを測定できる。ノバメトリックスとブリュエルケアは、 SpO_2 ・心拍数・オキシグラフが測定できる。

サンプリング流量は、ノバメトリックスはメインストリーム型であるためサンプリング量の必要がなく、カプノstattセンサは軽量であり、小児のモニタとして使用するに優れている。サイドストリーム型の中では、ブリュエルケアはサンプリング量が 90 ml と比較的少ない。

使い良さでは、測定前に毎回較正の要らないブリュエルケア、ラスカルが使い良いが、ラスカルは電源として 15 A 必要であるため、容量 20 A 以上のコンセントに直接接続しなければならない。延長ケーブルを使用するとオーバーヒートの危険性がある。

重量や大きさでは、ラスカルが一番重く大きくて、狭い部屋での使用には多少難がある。

消耗品は、サンプリングチューブや測定チャバーがあるが、再生使用が可能である。カプノマックとラスカルは、専用キャリプレーションガスやアルゴンガスが必要である。

精度は上記の実験と臨床研究の結果、4 種カプ

表3 4種カプノメータ比較

	ラスカル	ノバメトリックス	カプノマック	ブリュエル・ケー	
精度	良	良	良	最良	
測定項目	O ₂ , N ₂ , CO ₂ , N ₂ O HAL, ENFL, ISO SEVO, Resp, Pulse	CO ₂ , SpO ₂ Resp, Pulse	O ₂ , CO ₂ , N ₂ O HAL, ENFL, ISO	O ₂ , CO ₂ , N ₂ O, SpO ₂ HAL, ENFL, ISO SEVO, Resp, Pulse	
ウォームアップ時間	5 min	6~8 min	20~30 min	1 min	
サンプリング流量	200 ml/min	—	200 ml/min	90 ml/min	
CO ₂ 応答時間	200 msec	125 msec	250 msec	53.3 msec	
使い良さ	単位	mmHg, %	mmHg, %, KPa	mmHg, %, KPa	
	較正	6ヵ月に1回	毎回(較正セル)	毎回	1~3ヵ月に1回
	電源	100 V 15 A	100 V 0.8 A	100 V 1.2 A	100 V 0.6 A
	重量	38.6 kg	9.5 kg	11.0 kg	12.5 kg
消耗品	サンプリングチューブ (ナフィオン) アルゴンガス	測定チャンバー	サンプリングチューブ (ナフィオン) 専用キャリブレーションガス	サンプリングチューブ (ナフィオン)	

HAL:ハロセン, ENFL:エンフルレン, ISO:イソフルレン, SEVO:セボフルレン, SpO₂:パルスオキシメータ, Resp:呼吸数

ノメータではブリュエルケアが最も理論値に近い値を示し、他の3種のカプノメータは臨床使用上十分にその機能が認められるが、計算式の違いによりブリュエルケアより大きい値を表示し、その結果 $a_{ET}P_{CO_2}$ が負になる例を生じることがある。

結語

4機種の原理の異なるカプノメータの精度を、標準ガスと臨床例で比較した。

カプノメータ機種間の差は、臨床例の正常 P_{CO_2} 範囲では2~2.5 mmHgの間にあり5% CO_2 標準ガスでは、4.6 mmHgであった。

ブリュエルケアは他の3機種より精度が高かった。その理由には機器の精度のほかナフィオンチューブを使用、飽和水蒸気圧補正を行っていることが考えられた。

使用上の観点などから4機種の機器の比較をあわせて行った。臨床で使用する場合 P_{ETCO_2} の変動をモニタとして見るか、または計測器として使

用するかの観点の違いはあるが、モニタでもあり計測器のように信頼性の高い値を反映するブリュエルケアが優れていると思われた。

(1991. 10. 28受)

文献

- 1) 謝宗安, 片桐淳, 山田倫子ほか:腹腔鏡的胆摘術と呼気炭酸ガスモニタ. 臨床麻酔 15: 719-722, 1991
- 2) Raemer DB, Francis D, Philip JH, et al: Variation in P_{CO_2} between arterial blood and peak expired gas during anesthesia. Anesth Analg 62: 1065-1069, 1983
- 3) Pillalamarri ED, Bhangdia P, Rudin RS, et al: Correlation of end expiratory CO_2 with P_{CO_2} during laparoscopy with CO_2 pneumoperitoneum. Anesthesiology 59: A177, 1983
- 4) Bramptop WJ, Watson RJ: Arterial to end-tidal carbon dioxide tension difference during laparoscopy. Anaesthesia 45: 210-214, 1990
- 5) Raemer DB, Calalang I: Accuracy of end

- tidal carbon dioxide tension analyzers. J Clin Monit 7 : 195-208, 1991
- 6) Severinghaus JW : Water vapor calibration errors in some capnometers : Respiratory conventions misunderstood by manufacturers? Anesthesiology 70 : 996-998, 1989
- 7) From RP, Scamman FL : Ventilatory frequency influences accuracy of end-tidal CO₂ measurements. Anesth Analg 67 : 884-886, 1988
- 8) 謝 宗安, 小石恵子, 大村昭人ほか : 呼気時間と $a_{ET}PCO_2$. 日本臨床麻酔学会誌 11 : 176, 1991
-