

●講 座●

呼気 CO₂ モニター (基礎編)

小松孝美

キーワード：呼吸ガスモニター, capnography, capnometer, end tidal CO₂I. 呼気 CO₂ モニター：
capnographs (capnometer)

呼気終末二酸化炭素分圧 (P_{ET}CO₂) と呼吸中の吸気・呼気の二酸化炭素分圧を測定し、その波形を示す装置が capnographs (capnometer) である。

呼吸に伴うガスの中の CO₂ の測定値を capnometer で測定し、時間軸を横軸に測定値を縦軸に示し、波形をグラフ化したものが capnogram で、呼吸ごとに二酸化炭素分圧を測定することを capnometry と言う。二酸化炭素分圧の測定、波形表示、記録などの全体を capnography と言い、呼吸中の CO₂ をモニタリングすることである。

本来、換気状態が適切（もしくは過換気か低換気）であるかの指標は動脈血二酸化炭素分圧 (PaCO₂) である。しかし PaCO₂ の測定のためには、動脈血採血を行い、ガス分析をしなければならず、手間がかかる。このため非侵襲的に PaCO₂ を推定する方法として、P_{ET}CO₂ が測定され換気のモニターとしてよく使用される。PaCO₂ と P_{ET}CO₂ は近似し、過換気になると P_{ET}CO₂ は低下し、低換気になると P_{ET}CO₂ は上昇する。健康成人の自発呼吸下の P_{ET}CO₂ は 35 ~ 40mmHg で、PaCO₂ より 1 ~ 4mmHg¹⁾ (挿管人工呼吸中は 5 ~ 10mmHg) 低い値になる。P_{ET}CO₂ は、PaCO₂ だけでなく、換気血流比、肺血流量にも影響を受ける (表 1)。

呼気 CO₂ モニターは麻酔中、集中治療中の患者の監

表 1 P_{ET}CO₂ に影響する因子

	P _{ET} CO ₂ ↑	P _{ET} CO ₂ ↓
換気量	低下 慢性閉塞性肺疾患 呼吸筋障害 呼吸中枢障害 換気量不足	増加 過剰換気 代謝性アシドーシス 急性呼吸促進症候群
CO ₂ 産生	増加 敗血症 代謝亢進 (発熱など) 炭酸水素ナトリウム投与 痙攣	減少 鎮静・鎮痛 低体温 全身麻酔
CO ₂ 運搬	増加 心拍出量増加	減少 心停止 肺塞栓症 肺血流量減少 (ショックなど)
呼吸回路など	再呼吸 二酸化炭素吸収剤の消耗	呼吸回路リーク 食道挿管 気道閉塞 サンプリング量不足
その他	四肢駆血帯の解除	浅く速い自発呼吸

(文献 9 を参考に作成)

視モニターとして開発された。

カプノグラムにより換気の有無、換気パターン、換気回数が確認でき、一定時間以上の波形を表示することで、常に換気の状態をモニタリングし確認できる。

II. 測定方法

呼気 CO₂ モニターによる測定は、赤外線吸収法で行われる。これは 2 種類以上の原子からなる気体は特定の波長の赤外線を吸収することを応用している。CO₂

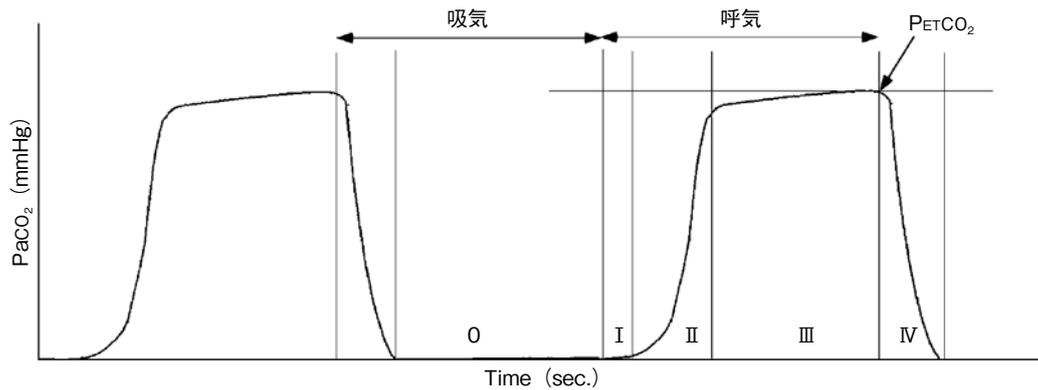


図1 正常 capnogram (文献3を参考に作成)

は $4.26 \mu\text{m}$ 付近の赤外線吸収する²⁾。この波長で吸収される光量は CO_2 の分子量に比例するため CO_2 の濃度が求められる。従来は広域スペクトルの赤外線をガスに照射し、赤外線のフィルターを通して戻ってきた光の量を検知し、ガスに吸収された量から CO_2 の分圧もしくは濃度を算出していた。そのため、他のガスや水分の影響を受けやすかった。最近では広域スペクトルの赤外線ではなく、 CO_2 の吸光スペクトルに一致する $4.2 \sim 4.3 \mu\text{m}$ の単一波長に近い赤外線を使用し他のガスや水などの影響を受けにくく、正確な測定がなされる機種が出ている。

サンプリング方法にも CO_2 センサーを直接呼吸回路に接続し、回路中のガスを直接測定するメインストリーム法（応答時間が短い、重く死腔量が多い、結露の影響を受けやすい、 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ まで温度が上がる、センサー受光部が汚染されると誤差が大きくなる）と呼吸回路から細いサンプリングチューブを接続し、ガスを一定の速度（ $50 \sim 200\text{mL}/\text{分}$ ）で測定装置に吸引するサイドストリーム法（応答遅延がある、水滴でサンプリングチューブが閉塞）がある。メインストリーム法でも小型の装置が出てきているが、一般的にはサイドストリーム法が多く使用されている。

他の測定法として質量分析法、Raman ガス分析などがあるが、臨床現場では普及していない。

Ⅲ. Capnogram (カプノグラム)

Capnogram は一般的に横軸に時間、縦軸に二酸化炭素分圧（あるいは濃度）を示した time capnogram (図1) が多く用いられる。Time capnogram (一般的には単に capnogram とする) では1回の呼気を4相に分け

て解釈される。第I相はマスク換気の際には咽頭や鼻腔、気管挿管（あるいはラリンジアルマスクが挿入）されている場合はそのチューブ内や気管、気管支内のガスが呼出される。この部分ではガス交換はされていない（解剖学的死腔の）ため二酸化炭素分圧はほとんど0である。第II相は死腔と肺胞に移行する部分の二酸化炭素分圧と言われ、肺胞からのガスが混合するため、急峻に上昇している。肺胞から出てくるガスはその肺胞の縮みややすさ（時定数）に従い出てくる。第III相は alveolar plateau とも言われ、肺胞からのガスを示す。正常肺では平坦である。第III相の最後は呼気が終了した点であり、この二酸化炭素分圧が PETCO_2 である。換気血流ミスマッチ（喘息発作時、肺気腫など）があると各肺胞からの CO_2 濃度にばらつきがあるため、右肩上がりの波形となる。第IV相は呼気が終了し吸気を開始されるため、急激に基線まで低下する。

Ⅳ. PaCO_2 と PETCO_2 の分圧較差 ($a-\text{ETPCO}_2$)

PaCO_2 と PETCO_2 の差の増加は肺胞死腔の増大を示す。生理学的死腔 ($V_D(\text{phy})$) 率は以下の式から求めることができる。

$$V_D(\text{phy})/V_T = (\text{PaCO}_2 - \text{PECO}_2)/\text{PaCO}_2$$

V_T : 一回換気量、 PECO_2 : 混合呼気二酸化炭素分圧

生理学的死腔率の正常値は0.33である。生理学的死腔には解剖学的死腔と肺胞死腔に加えて、気管チューブや呼吸回路も含まれる。この式では混合呼気二酸化炭素分圧 (PECO_2) を求めなくてはならない。そのた

表2 a-ETPCO₂が増加する原因

【肺塞栓】
血栓（静脈うっ滞）、空気塞栓、羊水、二酸化炭素（腹腔鏡）、脂肪塞栓
【肺動脈圧の低下】
心拍出量の低下（出血、心停止、ショック）、非依存性肺領域（腹臥位、座位）
【肺胞圧の上昇】
呼気終末陽圧換気（PEEP）、一回換気量の増加
【慢性閉塞性肺換気】

めには呼気ガスを集めるか呼気ガスの流量と濃度が必要となる。肺胞死腔率は次式で表される。

$$V_D(\text{alv})/V_T(\text{alv}) = (\text{PaCO}_2 - \text{PECO}_2) / \text{PaCO}_2$$

ここで PaCO₂ は P_{ET}CO₂ と近似することができると仮定すると、

$$V_D(\text{phy})/V_T = (\text{PaCO}_2 - \text{PETCO}_2) / \text{PaCO}_2$$

となり、PaCO₂ と P_{ET}CO₂ から肺胞死腔率を計算できる。肺胞死腔は通常換気が行われていない肺胞で発生する死腔である。これは、肺胞を灌流する肺動脈圧と肺胞内圧に影響を受ける。肺胞内圧が低くなれば、肺胞へ行く血流は減少し、死腔は増大する。表2に a-ETPCO₂が増加する原因を示す。

V. 呼気 CO₂ モニターの利用状況

麻酔中においてはガイドライン上⁴⁾、「鎮静時には呼出された二酸化炭素を測定可能な限りモニタリングし評価すべき」とされている。つまり、呼気 CO₂ モニターで十分な換気が行われていることを評価、確認すべきであると明記されている。そのため、手術麻酔時、全身麻酔では呼気 CO₂ モニターが全症例、鎮静時の区域麻酔でも、ほぼ全症例で使用されている。また上部消化管内視鏡の鎮静と麻酔のガイドライン⁵⁾では、プロポフォールを消化管内視鏡使用時の鎮静に使用する際には、パルスオキシメトリーは低酸素血症の早期発見には推奨されるが、換気のモニタリングには不十分であると明記されている。さらに深い鎮痛中は呼気 CO₂ モニターがリスクを減少させるので使用を考慮すべきであると推奨している。以上のように鎮静状態にある患者には呼気 CO₂ モニターの使用が求められている。

しかし、実際日本では手術室以外の回復室、観察室、

集中治療室で呼気 CO₂ モニターが使用されている施設はわずかである。これは医師が鎮静中絶えず観察できる状態でないと、呼気 CO₂ モニターの異常値などの判断が不適切に評価され、適切に対応しにくいためである。頻りに鳴るアラームのため、使用されないのが現状である。そのため、集中治療部設置のための指針⁶⁾においても、呼気 CO₂ モニターの常備は必須でなく努力目標とされている。米国の PCA ポンプ使用時でも呼気 CO₂ モニターの使用率は約 30% であり、やはりアラームの頻回さをその原因としている⁷⁾。また、呼気 CO₂ モニターが適切な値を示さなくなった場合、それがメインストリーム式ならセンサーの汚れが原因なのか、またサイドストリーム式ならサンプリングチューブカウオータートラップの問題かなど機械に熟知する必要がある。さらにセンサーやサンプリングラインに関するディスプレイ部の交換などが今後簡便かつ安価とならないと普及は困難である。

呼吸の観察は呼気 CO₂ モニターのみならず、他のモニター（心電図を応用した胸郭インピーダンス測定、オキシメトリーによる測定など）によってもなされているため、呼気 CO₂ モニターの特異度は高いが、落ち着いている状態では使用されないのが現状である。呼吸の状態を絶えず観察しなければならない危険な状態では呼気 CO₂ モニターに勝るものはないかもしれないが、状態が落ち着き、換気状態が安定している長期の人工呼吸管理患者では常時使用されるべきであるとは言えない。

現在、人工呼吸器の中には呼気 CO₂ モニターを利用したアルゴリズムを使用し、closed-loop の自動ウィーニングシステムを備えた機種も存在し、様々な可能性がある。呼気 CO₂ モニターは他の機器と併用しつつ、その特性を活かし、今後も応用が期待される。24 時間絶え間なくモニタリングするのではなく、状況に応じて使用することが効率的である。

心肺蘇生時にもその効果の判定に有効であり⁸⁾、今後様々な状況下での使用が期待されている。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) Graybeal JM, Russell GB : Capnometry in the surgical ICU : an analysis of the arterial-to-end-tidal carbon dioxide difference. *Respir Care*. 1993 ; 38 : 923-8.
- 2) Hess D : Capnometry and capnography : technical aspects, physiologic aspects, and clinical applications. *Respir Care*. 1990 ; 35 : 557-73.
- 3) Breen PH : Carbon dioxide kinetics during anesthesia. pathophysiology and monitoring. *Anesth Clin North Am*. 1998 ; 16 : 259-93.
- 4) American Society of Anesthesiologists : Standards for Basic Anesthetic Monitoring. 2015.
<http://www.asahq.org/~media/Sites/ASAHQ/Files/Public/Resources/standards-guidelines/standards-for-basic-anesthetic-monitoring.pdf> (2017年3月7日アクセス)
- 5) Lichtenstein DR, Jagannath S, Baron TH, et al : Sedation and anesthesia in GI endoscopy. *Gastrointest Endosc*. 2008 ; 68 : 815-26.
- 6) 日本集中治療医学会集中治療部設置基準検討委員会 : 集中治療部設置のための指針. 2002. <http://www.jsicm.org/ICU-kijun.html> (2017年3月7日アクセス)
- 7) Physician-Patient Alliance for Health & Safety : First National Survey of Patient-Controlled Analgesia Practices. 2013.
- 8) American Heart Association : 2010 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care.
http://heart.org/HEARTORG/CPRAndECC/Science/Guidelines/2010-AHA-Guidelines-for-CPR-ECC_UCM_317350.pdf (2017年3月7日アクセス)
- 9) 藤原康嗣 : カブノメーター. 稲田英一編. モニタリングのすべて. 東京, 文光堂, 2004, pp124.