特 集

特集：各種生体信号計測用センサの最新動向

呼吸モニタ用センサの最新動向

山 森 伸 二*

1. 呼吸とは

呼吸の目的は、外気から酸素 (O_2) を体内に取り込み、体内で産生された二酸化炭素 (CO_2) を体外へ排出することである。そのためには、換気 (外気が鼻口腔を経由して肺胞に入出入りし肺胞内のガスとの置換すること)、拡散 (肺胞の膜と毛細血管の壁を通して O_2 と CO_2 が交換すること)、循環 (血液が体内を移動して O_2 や CO_2 を運搬すること) の3つの機能が正常に機能していることが必要となる。そして、生体は換気を調整することにより、体内の O_2 と CO_2 の量を表す動脈血酸素分圧 (PaO_2) および動脈血二酸化炭素分圧 ($PaCO_2$) を正常に保っている。 PaO_2 は酸素が足りているかどうかを表す「酸素化」の指標であり、 $PaCO_2$ は体内で産生した CO_2 を適正に排出しているかを表す「換気」の指標である。

2. 呼吸モニタリングの意義

酸素化が不十分であれば低酸素症となって脳や各種臓器に障害をおよぼし、十分な酸素化のために高濃度の酸素を長時間吸い続けると肺が繊維化してしまう。また、換気が小さすぎれば体内に CO_2 が過剰に蓄積して呼吸性アシドーシスに、換気が大きすぎれば体内の CO_2 が放出されすぎて呼吸性アロカローシスとなり、いずれも pH が正常値から外れ、その異常が大きくなれば生体のホメオスタシスが崩れていろいろな障害をおよぼす。すなわち、生体の生命活動を

正常に維持するためには適正な酸素化と換気を維持する必要がある、そのための呼吸のモニタリングが必要となっている。

日本麻酔科学会が定めた「安全な麻酔のためのモニタ指針¹⁾」においては、麻酔中の呼吸管理に関して、「酸素化」と「換気」が適切におこなわれているかどうかをモニタリングすることが求められている。

このように呼吸のモニタリングは、自分で呼吸ができない麻酔中や人工呼吸器下の患者はもちろんのこと、鎮静薬などにより呼吸抑制された患者、睡眠時無呼吸症候群 (SAS)、慢性閉塞性肺疾患 (COPD)、神経筋疾患、乳幼児突然死症候群 (SIDS) など病院の手術室や集中治療室ばかりでなく家庭においても必要とされている。

3. 呼吸モニタリングの方法

呼吸の指標となる PaO_2 と $PaCO_2$ は、血液ガス分析装置を用いて測定することができるが、採血する必要があり無侵襲で連続に測定することができない。そこで、それらにかわるいろいろなモニタリング方法やセンサが実用化されている。呼気吸気の気流によって変化するフロー/圧/音/温度などを検出する方法、呼吸による胸や腹の動きを検出する方法、 PaO_2 と $PaCO_2$ のかわりとなるガス成分を検出方法などがある。表1は呼吸のモニタリングに関する主なパラメータを分類したものである²⁾

呼吸のモニタリングは、患者の状態と使用される部門によってその要求内容が大きく異なる。特に、患者が気管挿管しているかないか

* 日本光電工業(株) 荻野記念研究所

表1 主な呼吸パラメータの分類

機能	測定パラメータ
換気運動	呼吸数, 1 回換気量, 分時換気量, 呼吸流量, 気道内圧, 肺のコンプライアンス, 呼吸抵抗
ガス成分	動脈血酸素飽和度, 呼吸炭酸ガス分圧, 動脈血酸素分圧, 動脈血炭酸ガス分圧, 酸素消費量, 炭酸ガス産生量

表2 挿管/非挿管と部門に対する要求事項

	部門	要求事項
挿管	手術室(全身麻酔), 集中治療室(人工呼吸器),	正確, 信頼性
非挿管	一般病棟, 集中治療室 睡眠時無呼吸検査, 鎮静を伴う検査, 術後回復室, 手術室(腰椎麻酔)	低(無)拘束, 簡便, 安価

表3 主な測定方法とその特長

測定方法	測定部位 (センサ装着部位)	測定項目				特長
		呼吸数	換気量	CO2	O2	
気流	温度センサ	鼻及び口	○			鼻呼吸と口呼吸の検出
	気流圧センサ	鼻	○			口呼吸が検出不可
	マイクロフォン	鼻又は頸部	○			呼吸音又はいびきを検出
	フローセンサ	気管チューブ	○	○		挿管された患者が対象
	気道内圧センサ	気管チューブ	○			挿管された患者が対象
動き	胸部インピーダンス	胸と腹の電極	○			ECG 電極で同時計測
	インダクタンス	胸と腹のバンド	○			閉塞性の呼吸を検出可能
	画像など	胸/腹の動き	○			無拘束
	マットレスセンサ	胸/腹の動き	○			無拘束, SIDS
ガス	パルスオキシメータ	手足の指			○	酸素化のモニタとして必須
	カブノメータ	気管チューブ	○	△ ¹⁾	○	全身麻酔時は必須
	経皮酸素モニタ	胸部			○	新生児用
	経皮炭酸ガスモニタ	胸部		△ ¹⁾	○	新生児用

¹⁾ 換気量は測れないが換気が適正かどうかを判定できる

によって, モニタリングの方法も異なる. 表2にそれぞれの要求事項をまとめる. 呼吸のモニタリングは, 気流の検出, 胸や腹の動きの検出, ガス成分の検出の3つに大きく分類することができる. 表3に現在使用されている主な測定方法とその特長を示す.

気流や動きの検出は, 体に装着するセンサが簡便で低侵襲などの特長を持ち広く普及しているが, 一般的に定量的な測定は困難である. また, 胸や腹が動いても実際には換気がおこなわれていない(閉塞性無呼吸), 換気はおこなわれているが酸素化が不十分(低酸素), 高濃度の酸素吸入により酸素化は十分だがCO₂の排出が不十分(低換気), などの異状は検出できないため, 重篤な患者にはこれらのモニタリングだけでなくガス成分のモニタリングが併用される.

1) 気流の検出

気流の変化をフロー, 温度, 圧, 音などで検出する方法である. センサは安価で鼻や口の周囲あるいは頸部に簡便に装着することができ患者への侵襲性は低いが, 相対的な変化しかわからず定性や正確性に欠けるという問題がある. 主に気管挿管されていない患者に使用される. 一方, 気管挿管され呼吸状態を正確に把握する必要がある全身麻酔中や人工呼吸器下の患者では, 呼吸回路内にフローセンサや気道内圧センサが設けられているため定量的な測定が可能であり, それらは必須のセンサとなっている.

2) 胸/腹の動きの検出

胸の動きを捉える胸部インピーダンス法(呼吸による胸郭の動きを胸と腹に張った2つの電極間のインピーダンス変化から読み取る)は,

ECG 検出用の電極を併用でき簡便なため、呼吸数のモニタリングとして最も普及している。ただし、波形に心電図が重畳して呼吸数ではなく心拍数をカウントしたり、体動の影響を受けやすいなどの欠点がある。

同じように胸や腹の動きを捉えるインダクタンス法（胸と腹の周囲にそれぞれ巻いたバンドのインダクタンスが変化する）では、胸と腹の動きを別々に計測できるため、閉塞性の無呼吸を検出でき、SASの検査に使用されている。

画像やマットレスセンサは、ほぼ無拘束で呼吸数を計測できるという特長がある。画像による方法は、赤外線カメラで呼吸による鼻や口周辺の温度変化を検出するものや、画像処理により微妙な胸の動きを検出するものなどがある。マットレスセンサは感圧素子などをベッドの下に敷いて呼吸による圧力の変化を検出するものであり、SAS検査やSIDSのモニタとして実用化されている。

3) 呼吸ガス成分の検出

呼吸中に含まれる炭酸ガスの濃度を測定するカプノメータは、呼吸の最後の濃度、すなわち終末呼吸炭酸ガス分圧 ($P_{et}CO_2$) から P_aCO_2 を推定することができるため、換気量そのものは測定できないが換気が適正であるかどうかを判定することができる。通常 $P_{et}CO_2$ は P_aCO_2 よりも僅かに低い程度だが、肺が繊維化してガスの拡散が悪くなっている患者、気道が狭くなって肺胞からのガスが呼出されない患者などでは、 $P_{et}CO_2$ と P_aCO_2 の差が大きくなることがあり、注意が必要である。呼吸吸気で変化する炭素ガス濃度の波形（カプノグラム）は、正常時は安定した台形状の波形を繰り返すが、換気の異常や、気管チューブや呼吸回路の外れ、食道挿管、人工呼吸器の故障など機器類の異常があれば波形が異常となり、これらの異常を即座に検出することができるため、カプノメータは気管挿管された患者に対して最も信頼性の高い換気のモニタとなっている。

4) 経皮的ガス成分の検出

酸素化の指標である P_aO_2 の代わりにパルスオキシメータを用いて動脈血酸素飽和度 (SpO_2) をモニタリングすることができるよう

になった。手足の指や甲などに赤色と近赤外線光を交互に照射し、透過してきた光の脈動による変化分から動脈血酸素飽和度を求めることができる。LEDとフォトダイオードが内蔵されたプローブを装着するだけで、無侵襲に連続して測定でき、体動にも強く、理想的なモニタである。手術室や集中治療室ではもはやパルスオキシメータなくしては、患者の安全を確保できない。ただし、パルスオキシメータは呼吸のモニタとして万能ではない。例えば高濃度酸素投与下で突然無呼吸になっても、血液中に十分な O_2 があるため SpO_2 はなかなか低下せず、低換気や無呼吸の検出が著しく遅れることがある。すなわちパルスオキシメータは「酸素化」をモニタリングすることは可能であるが「換気」が適切であるかどうかはモニタリングできないので注意が必要である。

経皮酸素および炭酸ガスモニタは、皮膚を一定温度まで加温し皮下の毛細血管を拡張させて血流を十分に増加させ、血液中の酸素および炭酸ガスが皮下組織や皮膚に拡散するものをセンサで感知し、その値を元に P_aO_2 と P_aCO_2 を導き出す方法であり、経皮的に測定した酸素・炭酸ガス分圧は $tcPO_2$ ・ $tcPCO_2$ と表す。非観血的に連続測定することができ、未熟児や新生児では採血を極力少なくすることができるため有用である。

経皮酸素モニタはパルスオキシメータと異なり、高濃度領域の測定が可能で体動の影響を受けけないなどの利点がある反面、皮膚が薄くかつ末梢循環が保たれていないと正確な値が得られないという大きな制約や、 $42^\circ C$ 以上に加温する必要があるためセンサによる低温火傷のリスクがあり、最近は酸素化に関してはパルスオキシメータによる SpO_2 をモニタリングすることが一般的になっている。

一方経皮炭酸ガスモニタは、カプノメータによる $P_{et}CO_2$ の測定が困難である場合がある未熟児や新生児で使用されている。ただし、皮膚のガス透過性がよくても、末梢循環の状態が悪いと精度が劣ったり、やはり火傷のリスクがあるといった問題がある。また、呼吸を測定する必要がないため、挿管されていない場合でも測

定することが可能である。ただし、応答が遅いので呼吸ごとの変化を検出することはできず、無呼吸の迅速な検出はできない。

4. 呼吸モニタリングの最新の動向

表2および表3に述べたように、患者やそのサイトによって呼吸モニタリングに要求される事項が異なる。気管挿管された患者では、パルスオキシメータとカプノメータがあれば基本的に十分な呼吸モニタリングが可能である。一方、挿管されていない患者では、薬により呼吸抑制された患者、SAS患者、呼吸中枢が未発達な新生児など患者もサイトも多岐にわたる。

1) 最新の酸素化のモニタリング

酸素化のモニタリングとして、パルスオキシメータはプローブを指などに装着するだけで、校正も不要で連続して SpO_2 のみならず心拍数も検出することも可能であり、医療現場の多くの場面で使用され広く普及している。最近の機器では、体動があっても測定精度に影響しない、波長を増やして SpO_2 のみならずメトヘモグロビンやカルボキシヘモグロビンの測定も可能、額にプローブを装着して低酸素を指プローブよりも素早く検出できる、など特徴のある機器も実用化されている³⁾。「酸素化」のモニタリングとしては、当面 SpO_2 に代わる新しいモニタリングは見あたらない。

2) 最新の換気のモニタリング

「換気」のモニタリングとしては、カプノメータが最も信頼性が高いといわれているが、価格が SpO_2 モニタに比べて高い、加温加湿器により加湿された呼吸回路に使用した場合に水滴の影響で測定が中断してしまうことがある、などの問題があり、手術室では必須となっているものの、その他の部門での普及は限定的である。

しかし、人工呼吸器使用中の事故は後を絶たず、気管挿管され人工呼吸器使用下ではカプノメータを必須とすべきという意見も多い^{4,5)}。最近の機器では、加湿によるトラブルが軽減しており、一層の普及が期待される。

一方カプノメータの新しい適用として、挿管されていない患者の呼吸管理に使用されるよう

になってきた。各種検査や術後の患者は一般的には意識もあり自発呼吸できるのでパルスオキシメータと胸部インピーダンスによるモニタリングで済ませてしまうことが多いが、鎮静薬や鎮痛薬により呼吸抑制や閉塞性無呼吸が発生しやすい。酸素化はパルスオキシメータによりモニタリングできるが、閉塞性無呼吸の患者などでは換気の異状を胸部インピーダンスでは見逃してしまうことがある。そこで考案されたのが、挿管されていない患者の鼻の下に装着しカプノグラムや $PetCO_2$ を検出する超小型カプノメータcap-ONEである。図1にcap-ONEを装着した写真を示す。cap-ONEを使用すれば鼻呼吸でも口呼吸でも $PetCO_2$ を精度よくモニタリングでき、無呼吸や低換気を即座に検出することができる^{6,7)}。

図1 cap-ONE とその装着方法

5. 呼吸モニタリングの課題と 目指すもの

SASの検査では、無呼吸時に閉塞型、中枢型あるいはその混合型の無呼吸であるか判定する必要がある。そのため、インダクタンスによ

図2 閉塞型無呼吸と中枢型無呼吸時の波形

図3 閉塞性無呼吸時の胸部インピーダンスとカプノグラム

る胸と腹の動きのモニタリングがおこなわれている。閉塞型無呼吸であれば無呼吸時に胸と腹の動きが逆位相となり、中枢型では胸も腹も動かないため波形はフラットとなる。図2に閉塞型および中枢型の無呼吸時の気流（温度）、胸と腹の動き、 SpO_2 の典型的な変化を示す。インダクタンスバンドは呼吸の仕方や装着状態によって波形が歪んだり出現しないことがあり、より正確に閉塞型か中枢型かを検出できる方法が望まれる。

未熟児や新生児の呼吸モニタリングでは、一般的には侵襲が少ないパルスオキシメータと胸部インピーダンスが使用されている。これらの患者は呼吸中枢が未熟なため無呼吸の検出が必須であるが、皮膚が弱くセンサやチューブ類を皮膚に固定することをなるべく避け、かつ拘束性を少なくしたい。そのためECG電極と併用できる胸部インピーダンスによる呼吸計測が広く採用されているが、胸部インピーダンスは体動や体位変化の影響を受けて呼吸と誤認識することがある、電極の位置が適切でないと呼吸を認識できない、などの課題がある。さらに、閉塞性無呼吸では無呼吸時に胸郭が動くため、無呼吸を検出できないことがある。図3は、閉塞性無呼吸患者の換気状態を胸部インピーダンスとカプノメータで同時に測定したものである。無呼吸時にカプノメータでは波形が消失しているが、胸部インピーダンスでは、完全には消失せず無呼吸と判定されない場合がある。

「酸素化」のモニタはパルスオキシメータがすでに標準となっている。挿管された患者の「換気」のモニタは、カプノメータで機能的には十分なモニタリングが可能である。しかし、

人工呼吸器下の事故は後を絶たない。加湿に対する性能を改善したカプノメータの普及がなによりも望まれる。挿管されていない患者の「換気」のモニタは部門によって要求が異なり、新生児ではセンサ類の装着そのものが問題となっている。しかし実質的に「換気」をモニタするにはカプノメータが最適である。未熟児や新生児にも装着できる超小型カプノメータが望まれる⁸⁾。

文 献

- 1) 日本麻酔科学会. 安全な麻酔のためのモニター指針. 日本麻酔科学会, 2009.
- 2) 久保田博南. バイタルサインモニタ入門. 秀潤社, 2000.
- 3) 山陰道明, 松本真希, 並木昭義. 呼吸器系モニターの進歩. 臨床麻酔. 2006, Vol. 30, No. 7, p. 1133-1144.
- 4) 稲田英一. カプノメトリが向上させた麻酔の安全性. LiSA. 2005, Vol. 12, No. 10, p. 998-1001.
- 5) 近藤陽一. すべての呼吸管理患者にカプノメータを！. LiSA. 1995, Vol. 2, No. 1, p. 40-44.
- 6) 森岡宣伊, 山森伸二, 尾崎 真. 小型メインストリーム型カプノグラフィの術後呼吸監視における有用性. 麻酔. 2006, Vol. 55, p. 1496-1501.
- 7) Yamamori S., Takasaki Y., Ozaki M. et al. A Flow-through Capnometer for Obstructive Apnea. J Clin Monit. 2008, 22, p. 209-220.
- 8) Folke M., Cernerud L., Ekström M. et al. Critical Review of Non-invasive Respiratory Monitoring in Medical Care. Med. Biol. Eng. Comput. 2003, 41, p. 377-383.