

□ 特集：酸素飽和度測定 of 過去・現在・未来 □

小型耳朶センサーによる $PtcCO_2$ と SpO_2 の同時モニタリング

久保田 博 南* 落 合 亮 一**

はじめに

パルスオキシメータと経皮血液ガスモニターは、測定パラメータがともに血液ガスに由来していることに共通点がある。しかも、その両者の開発は 1960 年代の後半から 70 年代の前半で、ほとんど同じ時期だったことも興味深い。つまり、経皮血液ガス電極もパルスオキシメトリも、確立された基本技術の背景が近似している。

パルスオキシメトリが広く臨床で用いられているのに対して、経皮酸素分圧 ($PtcO_2$) や経皮的二酸化炭素分圧 ($PtcCO_2$) は主に未熟児・新生児での使用に限定されている。その一番の理由は、成人の厚い皮膚を通して血液中のガス (酸素、ならびに二酸化炭素) を検出するためには、解決すべき課題が多いためである。実際、新生児の皮膚は薄く、これらのガスを透過しやすい、というのも経皮電極の新生児適用が有利な点である。したがって、経皮的ガスモニターの成人へのアプリケーションは難題であった。

ところが、ごく最近になって、パルスオキシメトリ用と $PtcCO_2$ 用の両センサーを小型のイヤープローブに組込み、成人への適用が可能という装置が開発された。 $PtcCO_2$ の測定のために、プロローブにヒータを内蔵していることが特徴である。本来、両パラメータの測定から、酸素化と換気の状態を同時に評価可能なことを期待して開発された。ところが、耳朶を加温することにより、パルスオキシメトリそのものに対しても有用であることが分かってきた。

本稿では、この小型複合センサーを利用したモニターを中心として、その相乗効果に関する実情と今後への展開などについて述べたい。

1. モニター本体とセンサー

写真 1 は、成人を主な対象として経皮的二酸化炭素分圧 ($PtcCO_2$) と酸素飽和度 (SpO_2) が同時に測定できるモニターの外観を示した。スイスのリンデ・メディカル・センサーズ社 (Lined Medical Sensors) 製で、商品名は TOSCA という (TOSCA とは、Transcutaneous Oxygen Saturation Carbon dioxide system からの頭字語で、「経皮的酸素飽和度・二酸化炭素システム」というような意味である)。

この装置の主目的は、これまで新生児分野でのみ適用されてきた経皮的二酸化炭素のセンサーをパルスオキシメトリのセンサーと組み合わせることにより、成人におけるガス交換の状態を酸素と二酸化炭素の両面から追跡するのがねらいである。パルスオキシメトリの広範なアプリケーションにより酸素関係の研究が一般化しているのに対して、二酸化炭素モニターが呼気終末二酸化炭素モニターに限られ、情報の不足している現状を打破したいという意図である。

本体の表示画面には、左側に酸素飽和度 (SpO_2) と脈拍数の数値、中央に脈波やトレンド



写真 1 $PtcCO_2$ と SpO_2 がモニターできる TOSCA の外観

* ケイ・アンド・ケイ ジャパン代表取締役

** 慶應義塾大学医学部麻酔学教室

などの波形情報，右側に経皮的二酸化炭素分圧 ($PtcCO_2$) の数値が表示されるようになっている。

$PtcCO_2$ および SpO_2 を測定する小型センサーは耳朶に装着できるように工夫されており，OxiCarbo[®] という商品名がつけられている。写真 2 は，OxiCarbo[®] を耳朶に装着したときのようなすが示してある。センサーを保持する専用クリップに接着テープを貼り付け，その粘着力により耳朶に固定するようになっている。



写真 2 OxiCarbo[®] を耳朶に装着したときの様子

このセンサーの特徴は，パルスオキシメトリの発光・受光部も一体化して組み込んだことにある。図 1 は，OxiCarbo[®] の構造と動作原理が示されている。

まず，二酸化炭素分圧用のセンサー部であるが，方式自体は従来から使用されているもので，開発者の名前からストー・セヴェリングハウス (Stow-Severinghaus type) 電極と呼ばれる。いわゆる pH ガラス電極であり，二酸化炭素により参照電極との間に発生する電圧を測定する方式をそのまま利用している。Ag-AgCl から構成される参照電極は，pH 電極との電位差から二酸化炭素分圧が計測できる（その電位差が二酸化炭素分圧の対数に比例する）。

センサーを 42℃ に加熱するため，内部にヒーターとそれを制御するためのサーミスタ 2 本が内蔵されている。これにより，耳朶組織内血液の「動脈化」が促進され，静脈血や毛細管血液が動脈血に近い状態になる。したがって，pH 電極まで到達した二酸化炭素は，動脈血二酸化炭素分圧に近似するとされている。

一方，パルスオキシメトリ用のセンサー部は，通常の発光ダイオード (LED) とフォトダイオードから成り立っている。一般的なパルスオキシメトリの利用であり，660nm の赤色光と 910nm の赤外光を使用している。しかしながら，これまで広く使われている透過型でなく，反射型を採用して

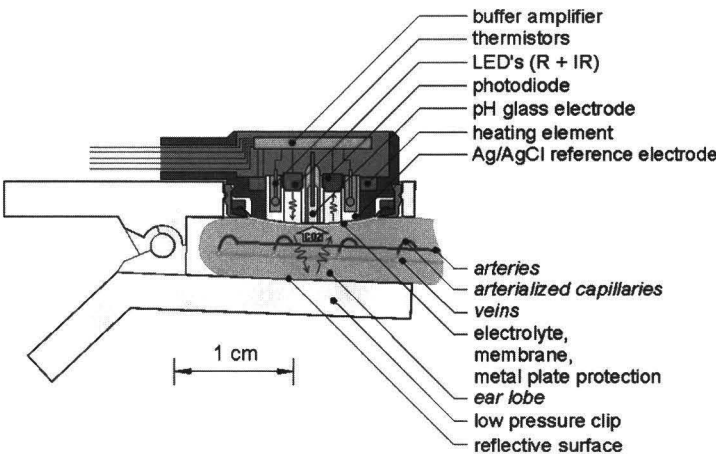


図 1 OxiCarbo[®] の構造と動作原理

いるところに特異性がある。つまり、耳朶の表面側に取り付けられたセンサー内に発光部と受光部があり、耳朶の後ろ側のクリップに白色の反射面がある。耳朶はこの両者の間に挟まれているため、耳朶内部の血流の変動に伴って吸光された反射光を検出していることになる。

そのセンサーの外観を写真3に示す。メンブレンを装着前（下）と計測可能な装着後（上）の写真である。センサー内に見えるプローブは、左から順に、パルスオキシメトリ用の発光部、経皮 pH 電極、パルスオキシメータ用受光部である。なお、 PtcCO_2 用参照電極（Ag-AgCl 電極）はメンブレンの下に見える金製の薄膜に接触している。

2. モニターの仕様概要

従来型の経皮血液ガスモニターの欠点の一つは、 44°C 程度までに加温することによる、連続モニター時間の制約である。実際、新生児や未熟児に適用されるケースでは、測定時間は約 4 時間程度に制限される。

TOSCA の特徴の一つは、経皮血液ガス測定を二酸化炭素だけに絞る込むことにより、比較的低温の 42°C でも測定精度が維持できることにある。その結果、連続測定時間も 12 時間程度まで拡大できることの意義は大きい。

表は、TOSCA の概要仕様を一覧表にしたもの



写真3 OxiCarbo®の外観
上：メンブレン装着時、下：センサー表面露出時

である。

経皮的二酸化炭素分圧の精度は、標準校正ガスにより直接的に校正されるので、誤差は経時的なドリフトのみに依存する。実際のドリフトは1時間当たり 0.5% 以内であり、数時間程度の連続測定では支障はない。

なお、最近の経皮血液ガス分圧測定は、校正が楽になったことで使いやすさが向上している。かつては測定開始前に 10 分程度の校正時間が必要であったが、TOSCA ではわずか 2 分程度で校正が終了する。もちろん、使用していない場合にプローブを校正チャンバ内に入れておきさえすれば、常に自動校正が完了している状態を保てるので、緊急の場合でもすぐに測定が開始できる。さらに、メンブレン交換がワンタッチの治具で取り付けられる点である。かつて経験したように、ピンセットを使って薄いメンブレンをセンサーの上に置くような煩雑な手作業は、現在では不要になっている。

パルスオキシメトリの測定精度に関しては、反射型を採用していても透過型と何ら変わらない。精度を議論する場合、基本原理は同一なので、脈波信号が検出できている限り誤差に影響は出ない。むしろ、 42°C に加温していることから、信号対雑音比や灌流時の信号検出精度については、大幅に改善されている。つまり、広義に解釈すれば、 PtcCO_2 ならびに SpO_2 の測定精度が向上しているということができ、OxiCarbo®にとっては副次的効果と考えられるが、加温式パルスオキシメトリの有効性を将来チェックするための試金石ともなるであろう。

3. 予備実験結果

TOSCA は 2002 年にヨーロッパで開発された機種なので、スイスを中心とした諸国で予備的な実験データが発表されている。

一番の関心事は、従来型の経皮血液ガスモニター用センサー（ $\text{PtcCO}_2 + \text{PtcCO}_2$ ）に比較して、耳朶用の OxiCarbo®はやや小型に作られたセンサーのため、十分な機能が発揮できるかどうかという点にある。この課題については、従来型のセンサーと同時測定・比較することによって、その

表 TOSCA の仕様概要

測定パラメータ	経皮的二酸化炭素分圧 (PtcCO ₂) 動脈血酸素飽和度 (SpO ₂)
表示パラメータ	経皮的二酸化炭素分圧 (PtcCO ₂) 動脈血酸素飽和度 (SpO ₂), 脈拍数 (PR)
表示画面	LCD および LED
測定範囲	経皮的二酸化炭素分圧 (PtcCO ₂) : 0-200mmHg 動脈血酸素飽和度 (SpO ₂) : 0-100% 脈拍数 (PR) : 25-250bpm
測定精度	経皮的二酸化炭素分圧 (PtcCO ₂) : 反応時間 (<i>in vitro</i>) 50 秒以内 ドリフト (<i>in vitro</i>) 0.5%/h 以下 動脈血酸素飽和度 (SpO ₂) ±2 デジタル (80-100%) ±3 デジタル (60-79%) 脈拍数 (PR) : ±1%, ±1 デジタル
警報機能	各表示パラメータの上下限
校正	標準校正ガス使用 校正時間 : 通常約 2 分
連続モニター時間	12 時間以内 (42℃ の場合)
センサー温度	37-45℃ (0.5℃ ステップで可変) 制御精度 : ±0.2℃
メンブレン寿命	14 日間 (通常使用の場合)
電源	AC100V, 外部電池または内部電池
本体寸法	135×266×300mm (HWD)
本体重量	5.0kg (ガスシリンダーを含む)

性能が証明されている。

図 2 は、従来型の経皮血液ガス用センサー Combi-type 82 (同じくリンデ・メディカル・センサーズ社製) を成人の上腕に装着し、同時に耳朶に OxiCarbo[®] を装着して記録したデータの 1 例である。この測定は、安静後に過呼吸を行い、PtcCO₂ の変化を見ている。安静時では、OxiCarbo[®] のほうが 1, 2mmHg 程度高めの値を示していることが観察された。ところが、過呼吸に対する反応は、OxiCarbo[®] のほうが 50 秒ほど早く反応し、しかも PtcCO₂ の下降が急速で、かつ大きいことが分かる。この理由は、耳朶で動脈化が上腕でのそれより短時間で行われるため、動脈血の

変化情報を素早く感知できると考えられている。

一方、二酸化炭素用に加温されたセンサーではあるが、パルスオキシメトリに関しては「加温」という意味では初めてのセンサーである。その反応を見るための実験データを図 3 に示した。従来型のパルスオキシメータセンサー (同じくリンデ・メディカル・センサーズ社製イヤースンサー) と OxiCarbo[®] を同時に装着してテストした結果である。

このグラフから明らかなように、OxiCarbo[®] で測定した数値がきわめて安定した値を示していることが分かる。これは、加温により血流が促進されるため、脈波信号がより安定していることを示

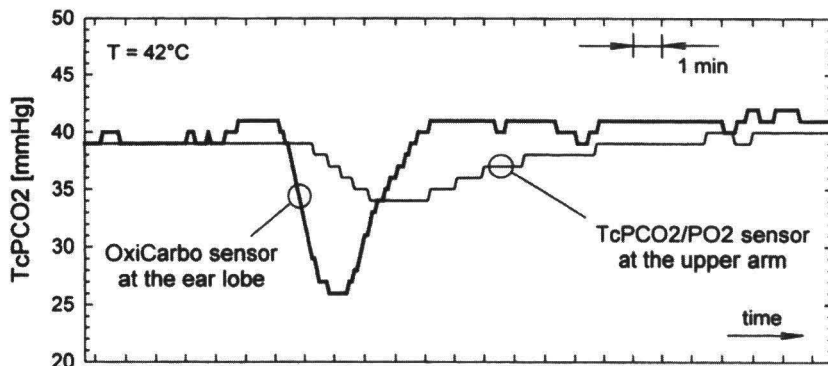


図2 従来型の Combi センサーと OxiCarbo[®]による PtcCO₂の測定データ比較
(Eberhard P, Gisiger PA, Gardaz JP, et al: Combining transcutaneous blood gas measurement and pulse oximetry. Anesth Analg 94: 76-80, 2002 より引用)

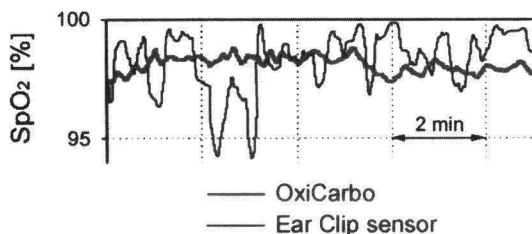


図3 従来型のイヤークリップセンサーと OxiCarbo[®]による SpO₂の測定データ比較

している。

図4には、従来型のパルスオキシメータセンサー（同じくリンデ・メディカル・センサーズ社製フィンガーセンサー）と OxiCarbo[®]を同時に装着してテストした結果である。この図では、A：過呼吸、B：息こらえ、C：30%の酸素吸入を行った際の SpO₂の反応をテストした結果を示している。いずれのケースでも、SpO₂が90%になる時点と比較している。

この事例では、その時間遅れを計測したところ、すべてのケースでフィンガーセンサーによる測定の方が遅延しているところを示している。このことは、OxiCarbo[®]による測定では末梢血管での SpO₂変動を敏感にキャッチすると判断することが可能である。一方、測定値自身には大きな差異が見られないことにも注目したい。つまり、加温によって、SpO₂変化がより早く検出可能であ

り、測定値の精度も維持されているという結論である。

結 び

経皮血液ガスモニターの方法論自体は古典的手法である。その方法を流用して、新しい知見が得られるとは考えにくかった。しかしながら、OxiCarbo[®]の新しいアイディアは、耳朶に装着するという点と、二酸化炭素だけを選定して酸素側はパルスオキシメトリに依存しているということであろう。

しかも、経皮的な血液ガス計測自体は二酸化炭素のみにしたことにより、42℃ という温度でも十分な効果があることから、比較的長時間（12時間）の連続モニターも可能となった。

さらに、幸いなことにその加温がパルスオキシメトリにとっても有効ではないかとの理論的裏付けも得られる結果になった。これにより、加温センサーによる換気と酸素化の相互比較も可能となったのである。

したがって、これまで二酸化炭素モニターといえば、カプノモニターがすべてのような状況であったが、方法論の異なる二酸化炭素モニターが利用できる可能性が出てきた。将来、これら相互比較を含め、さらにはパルスオキシメトリとの総合的な検討を行ううえでも、「古い手法の新しいモニター」に期待する余地は大いにある。

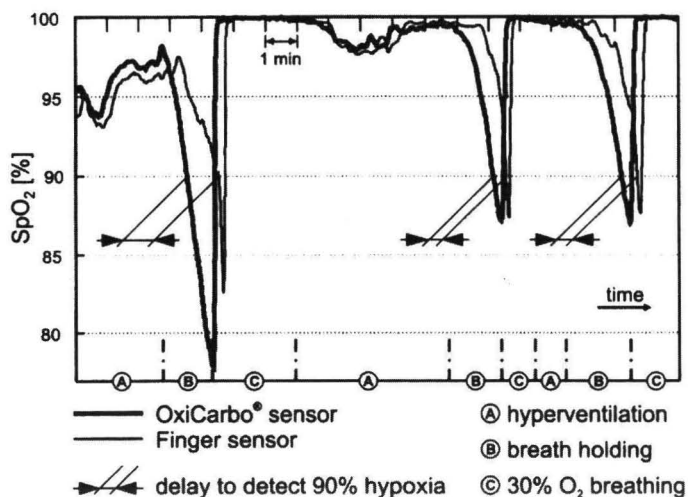


図4 従来型のフィンガーセンサーと OxiCarbo®による SpO₂ の測定データ比較

(Eberhard P, Gisiger PA, Gardaz JP, et al : Combining transcutaneous blood gas measurement and pulse oximetry. Anesth Analg 94 : 76-80, 2002 より引用)

引用文献

- 1) Eberhard P, Gisiger PA, Gardaz JP, et al : Combining transcutaneous blood gas measurement and pulse oximetry. Anesth Analg 94 : 76 - 80, 2002
- 2) Gisiger PA, et al : OxiCarbo, a single sensor for the non-invasive measurement of arterial oxy-

gen saturation and CO₂ partial pressure at the ear lobe. Sensors and Actuators B76 : 527 - 530, 2001

- 3) Rohling R and Biro P : Clinical investigation of a combined pulse oximetry and carbon dioxide tension sensor in adult anaesthesia. J Clin Monit Comp 15 : 23-27, 1999