

□ 特集：酸素飽和度測定の過去・現在・未来 □

最新テクノロジーとセンサ装着部位によるディレイ・タイム

時 津 葉 子* 落 合 亮 一**

はじめに

パルスオキシメータは、1974年に日本光電の青柳卓雄氏によりその原理が発見され、1980年代初頭にアメリカの麻酔科医 Dr. New (NELLCOR の創始者のひとり) らが改良・商品化し、動脈血酸素飽和度を連続的・非侵襲的に、しかもリアルタイムで測定可能な呼吸管理モニタとして、まず麻酔科領域に爆発的に広まった。その後、クリティカルケア領域のみならず、小児・NICU、呼吸器科領域に広がり、現在では一般病棟はもとより、透析室やリハビリテーション、在宅医療においても活躍している。このような状況下では、パルスオキシメータは、その精度だけでなく、体動や低灌流時にも正しい数値を提供することが求められている。ここでは、第1項で NELLCOR の最新機種に搭載されている3つの技術(第3世代以降の OxiSmart, OxiSmart XL, OxiMax technology) を解説し、第2項において、いかに早く患者の変化をとらえるかという観点から、センサ装着部によるディレイ・タイムについて述べたい。

1. パルスオキシメータの最新技術

1) 従来型パルスオキシメータの技術と弱点

パルスオキシメータは、酸素化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンの吸光特性を利用し、赤色光(R; 660nm)、赤外光(IR; 900nm)の吸光比率(R/IR)により SpO₂ を演算する(図1)。NELLCOR 第1・2世代に見られる従来型技術では、R, IRの吸光比率を波形のピークとボトムの2点から求めて SpO₂ を演算していた(つまり1拍に対して1個の SpO₂ を得ていた)ため、体動や低灌流時に

生体信号である動脈波形を認識できず、誤作動アラームを発生したり、測定不能となっていた。

2) 最新技術

これらの弱点を解決するための技術が、OxiSmart(第3世代)、OxiSmart XL(第4世代)および OxiMax(第5世代)である。最新技術である OxiMax には、これらすべての技術が搭載されている。

(a) OxiSmart technology

- 微分と最小二乗法

- SpO₂ 演算の方法

OxiSmart technology では、波形を1秒間に60ポイントに分割し、1ポイントずつ微分を行っている。この微分値(単位時間当たりの変化量)を、XY軸にそれぞれプロットし、0点から線を引くと、この傾きが、ある1ポイントでの SpO₂ となる(図2)。1拍の脈波をこのグラフにプロットし、これにもっとも誤差の少ないところに直線を引くと(最小二乗法)、この傾きが当該心拍における SpO₂ となる(図3)。この技術により、ピークとボトムの差が小さい低灌流時の脈波でも SpO₂ を測定することが可能となり、さらに体動が軽度であれば、ばらつきをある程度吸収し、よ

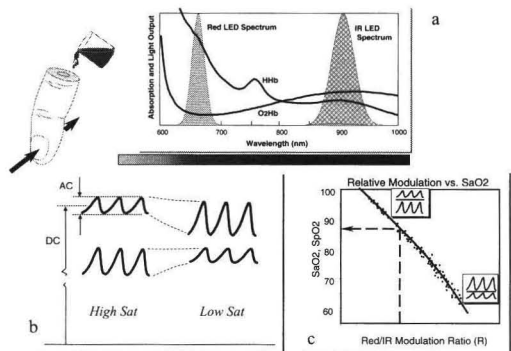


図1 ヘモグロビンの吸光特性と測定原理

* Tyco Healthcare Japan/NELLCOR

** 慶應義塾大学医学部麻酔学教室

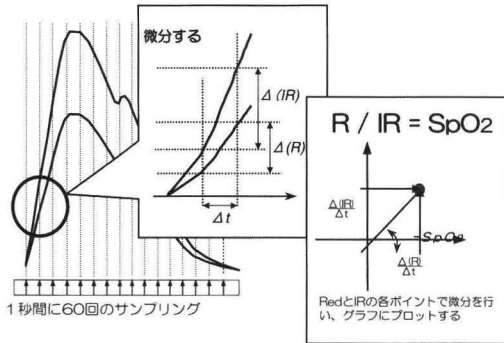


図2 OxiSmart technology：微分

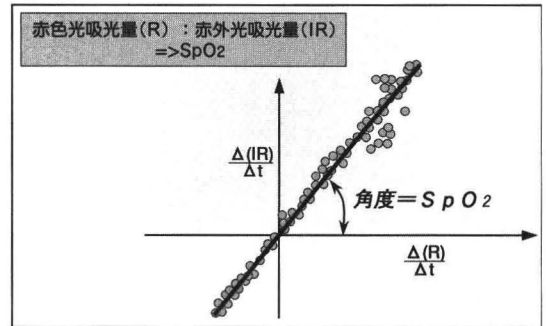


図3 OxiSmart technology：最小二乗法

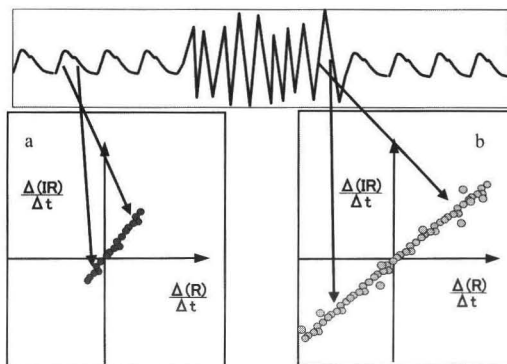


図4 OxiSmart technology：パターンマッチ (脈波認識)

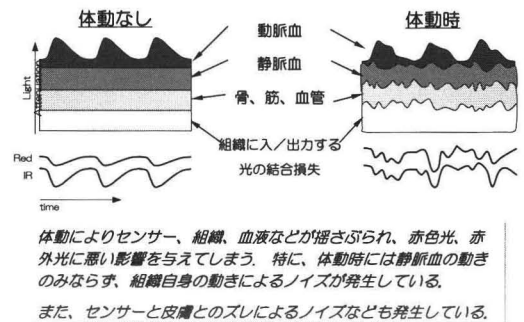


図5 体動によるノイズ

り正しい測定が可能となった。

○パターンマッチ (信号解析)

さらに前述した信号の微分と最小二乗法により、生体信号(動脈波形)と体動などによるノイズを識別できるようになった。動脈波形は急峻な立ち上がりと緩やかな下降という特徴を持っており、それをグラフにすると図4-aのように左右非対称となる。一方、ノイズは急峻な立ち上がりと急峻な下降という特徴を持っており図4-bのように左右に伸び、左右対称(1:1)となる。そのほか、波形のノッチの有無や、波形の左右のSpO₂比較、過去4拍のパルス比較など、数種類のパターンマッチにより、生体信号とノイズの識別が可能となった(なお、第3世代パルスオキシメータではノイズからの情報は演算に入れず、脈波のみからSpO₂や脈拍数を求める)。この技術によ

り、体動中もより正確な測定値を提供し、誤作動アラームを激減させた。

(b) OxiSmart XL technology (第4世代)

しかしながら、OxiSmart technologyでは情報として使用できなかったノイズの中にも、生体信号(動脈波形)は存在しており、この問題をOxiSmart XL technologyで解決した。体動などによるノイズは静脈血のゆれのみではなく組織のゆれなどによる吸光度の変化で構成されている(図5)。このノイズ混入波形の中から、新技術である適応くし形フィルタとKalman C-Lockを用いて動脈波形を抽出し、積極的にSpO₂と脈拍を測定する技術がOxiSmart XL technologyである(図6)。

●適応型くし形フィルタ

○脈拍数のトレース

脈拍は周期的な波形であるため、フーリエ変換によって基本波形とその整数倍である第2高長波、第3高長波、第4高長波……に展開すること

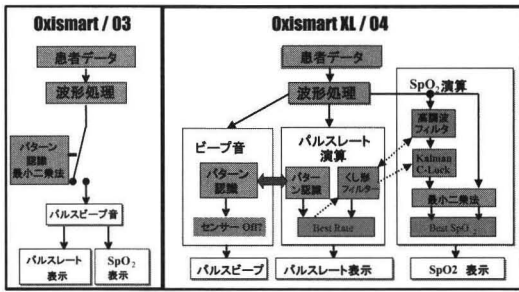


図6 OxiSmart XL technology

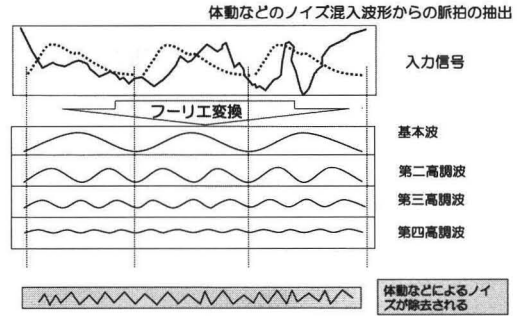
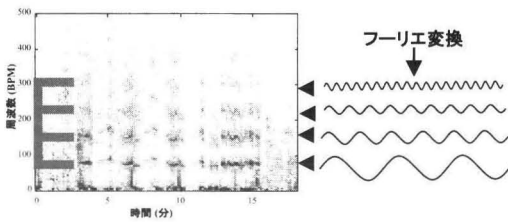


図7 OxiSmart XL technology：フーリエ変換



脈波の高速フーリエ変換(FFT-fast fourier transform)
 既知の脈拍数を参考として基本波の周波数を特定する
 くし形フィルタにより第2-4高調波を検出して、脈拍数を正確に追従する

図8 OxiSmart XL technology：フーリエ変換 & 適応型くし形フィルタ

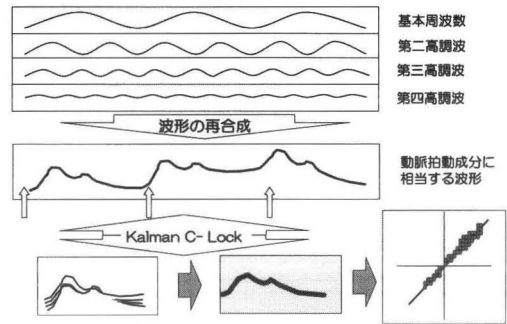


図9 OxiSmart XL technology：SpO₂ 演算

ができる (図7)。図8は体動でノイズが入った状態の波形を、高速フーリエ変換により周波数毎に分離したスペクトラム分析結果である。周波数80bpm付近が高密度となっており、これが基本周波数、つまり脈拍数であり、パターンマッチで得られた脈拍数を参照して特定される。さらに基本周波数の整数倍の部分も高密度になっており、これが第2、第3、第4高長波となる。この部分に適応型くし形フィルタを用い、体動のない状態でも、常に正確な脈拍数をトレースしている。

○ノイズ混入波形からの脈波抽出

これら基本周波と、第2、第3、第4高長波は動脈成分であり、そのほかの部分、ノイズである (図7, 8)。したがって、基本周波から第4高長波までを合成すると、動脈波となる (図9)。

● Kalman C-Lock

このようにして求められた脈波形は、若干のうねりをもっている。この波形を基本周波数で1拍ごとに分割し、4拍の波形を平均化することで、

さらにスムーズな波形を求め、前述した微分と最小二乗法によって SpO₂ を算出する (図9)。

OxiSmart XLでは、この2つの新技術と OxiSmart technology が、体動の有無にかかわらず常時作動しており、OxiSmart technology で測定できないノイズの混入を認めると、自動的に新技術で得られた数値に切り替えて表示する。

(c) OxiMax technology (第5世代)

OxiMax technology は、前述の2つの技術を搭載し、さらにセンサのキャリブレーション方法を大幅に改良して、デジタル・キャリブレーション・システムを開発した。この技術により新しいセンサの正確なキャリブレーション方法を確認し、その第一段として、精度の高い前額部センサを開発、低灌流状態での早い反応 (第2項参照) を可能とした。

● デジタルチップ

○ デジタル・キャリブレーション

前述したように SpO₂ は赤色光 R / 赤外光 IR から

計算されるが、実際は図 1-c のようなカーブに当てはめ算出される。本来センサの R. LED の波長は 660nm であるが、例えば製品誤差により波長が左方にずれると演算に誤差が生じ、 SpO_2 の値は低くなる (図 10-a・b)。そのため波長の違いによりキャリブレーションカーブを補正しなければならない (図 10-b・c)。そこで NELLCOR は今まで、センサ製造段階で LED の波長を測定して波長を抵抗値に置き換え、センサコネクタに抵抗を埋め込み、モニタ本体がその抵抗値を読み取ってセンサの LED の波長を認識、モニタ本体に記憶している約 20 本の補正カーブから適正なものを選び出し、正しい測定結果を得ていた (R-CAL Technology ; 図 10-c)。

ところが反射型など、既存のキャリブレーションカーブの当てはまらない新センサが開発されたため (図 10-c)，おのおののセンサのキャリブレーション情報をセンサコネクタに埋め込んだメモリーチップに保存した。つまりモニタ本体が、規定のキャリブレーションカーブを選択するのではなく、モニタ本体でセンサのチップ情報に基づいてキャリブレーションカーブを作り出す。この技術によりセンサ個々の精度をさらに向上させ、また将来にわたり、いろいろな用途・種類のセンサの開発が容易になった。

○センサとモニタのコミュニケーション

そのほか、このデジタルチップにより、測定不能時にセンサの状態をモニタに伝え、正確に測定するための対処方法を表示すること (トラブルシューティング) が可能になった。また、アラーム情報をセンサにメモリーすることも可能となり、診療科や診療場所を超えての患者の総合管理が可能となった。

2. センサ装着部と SpO_2 のディレイ・タイム
—いかに早く患者の変化をとらえるか—

パルスオキシメータはさまざまな技術により、低灌流状態における SpO_2 の測定を可能としたが、NELLCOR は患者管理においてもうひとつの重要な観点である “いかに早く患者の変化をとらえるか” ということに着目した。通常、成人においてセンサ装着部位は手指であるが、状況によっては

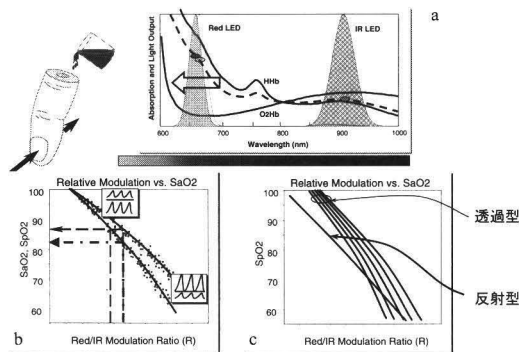


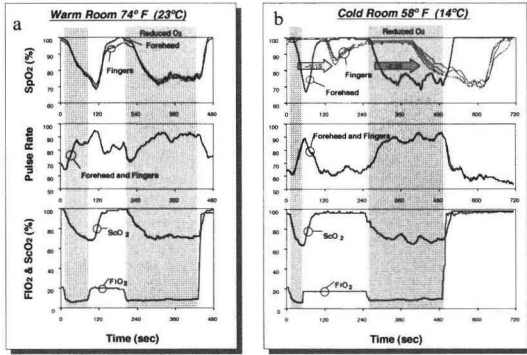
図 10 OxiMax technology : キャリブレーション

足指や耳朶などに装着することもある。では、これらセンサ装着部位によって、血液循環時間による誤差はどのくらいなのであろうか。また、どの部位がもっとも反応が早いのだろうか。

1) SpO_2 のディレイ・タイム
(a) 健康成人による初期の研究

Severinghaus ら¹⁾ は、6 種類のパルスオキシメータを使用して、健康成人の耳朶と手指の SpO_2 ディレイ・タイムを測定し、その差は 14-24 秒であり、手に冷感のある場合その差は 40 秒に達すると報告している。また、Hamber ら²⁾ の研究では、健康成人での SpO_2 ディレイ・タイムの平均は、耳朶と手指間で 6 秒、耳朶と足指で 63 秒、手指と足指で 57 秒と報告しており、低酸素血症をすばやくとらえるためには、足指は適当でない結論付けている。

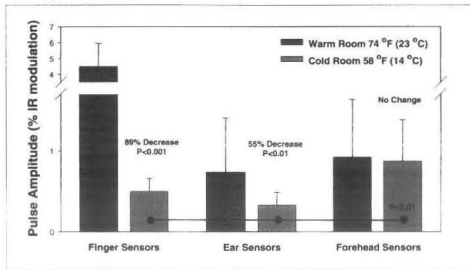
(b) 低灌流 = 末梢血管収縮状態での最近の研究では、低灌流による末梢血管収縮時のディレイ・タイムはどのくらいなのであろうか。Beboud ら³⁾ は、健康成人を低温暴露して低灌流と同様の末梢血管収縮を誘発し、前額部と手指での SpO_2 のディレイ・タイムを報告している。図 11-a は健康成人 (通常室温 ; 23℃) での結果で、前額部と手指には大きなディレイ・タイムはない。しかし、健康成人を 45 分間、14℃ の低温に暴露し、末梢血管収縮を誘発した場合、 FI_{O_2} を下げたあとの前額部と手指の SpO_2 の下降は、1、2 分もの差があり、また前額部の SpO_2 は、 FI_{O_2} の変化に対する脈拍や ScO_2 (マススペクトロメトリによる呼吸ガス分析の肺毛細管 SO_2) の変化に追従してい



Bebout, et al. Site Dependant Time Delays in Pulse Oximetry Monitoring. *Am J Resp & Crit Care Med* 163: A-142, 2001.

図 11 循環時間：warm vs. cold

各センサ装着部位における、
低温によって誘発された血管収縮作用の影響

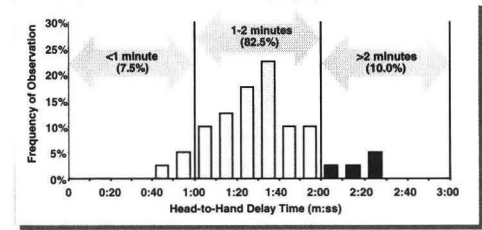


Bebout, D.E. and P.D. Mannheim: Effects of cold-induced peripheral vasoconstriction on pulse amplitude at various pulse oximeter sensor sites. *Anesthesiology* (submitted), 2002.

図 13 脈波振幅

タイムディレイヒストグラム

(Head-to-Hand change, Cold Room, 10 subjects, 4 transitions each)



Bebout, et al. Site Dependent Differences in the Time to Detect Changes in Saturation during Low Perfusion. *Crit Care Med*: 29(12): A115, 2001.

図 12 循環時間

よって顕在化した血管収縮神経反射作用は、前額部の皮膚には全く作用しないと報告している。また Gopfert ら⁸⁾ も、血管収縮薬によって誘発された重篤な循環障害では、前額部への血液供給は常に一定であり続けたことを報告している。

(b) 最近の研究

○各部位の脈拍振幅

実際に健康成人の脈拍振幅の%変化を測定することによって、血管収縮作用を評価した研究¹⁰⁾によると、通常室温(23°C)では手指の脈拍振幅がもっとも大きく(全IR信号の3-6%)、耳朶と前額部は1%以下である(図13グラフ黒)。しかし前述した実験同様に被験者を14°Cの低温に45分間暴露した場合、その振幅は手指で89%(P<0.001)、耳で55%(P<0.01)も小さくなり、前額部のみが通常室温の振幅と変化がなく(図13グラフ灰色)、手指に対して約2倍、耳に対して約3倍の振幅を持つことが確認された。

○前額部、耳朶および手指と co-oximeter の比較

橈骨動脈にカニューレーションした健康成人9名を、低温暴露により末梢血管収縮を誘発し、左右前額部(ヘッドバンド使用と、ヘッドバンドなし)と耳朶・耳介、手指でSpO₂を測定、FI_{O₂}によりSpO₂を変化させ、各SpO₂をco-oximeterのSaO₂と比較した研究¹¹⁾によると、FI_{O₂}を低下させてからSpO₂が変化するまでの平均遅延時間は、橈骨動脈の平均遅延時間(10.7±10.1sec)に対して、耳朶(25.6±8.5sec; P<0.001)および手指(77.5±28.4sec; P<0.0001)は有意に延長したが、前

ることが確認された(図11-b)。

同様の低温暴露の研究でも、FI_{O₂}を変化させてからの前額部と手指のSpO₂変化のディレイ・タイムは平均約1分30秒で、全体の90%以上が1分以上のディレイ・タイムであったと報告⁴⁾されている(図12)。

2) もっとも有効なセンサ装着部位はどこか?

これらの研究結果から、特に低灌流など末梢血管収縮を生じている患者においては、手指や足指よりも頭部での測定が有効であることが示唆されるが、では頭部のどの部分(つまり、耳朶、鼻、前額部など)がもっとも適当であろうか。

(a) 末梢血管収縮作用に関する初期の研究

すでに1940年前後に、皮膚の末梢血管収縮神経反射作用に関する研究が行われており^{5)~9)}、Hertzman ら⁹⁾は刺激や覚醒、深呼吸、低温に

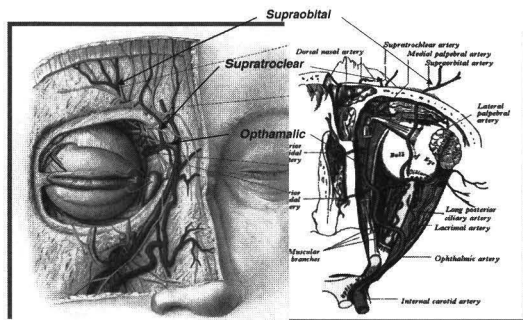


図 14 頭部の栄養血管

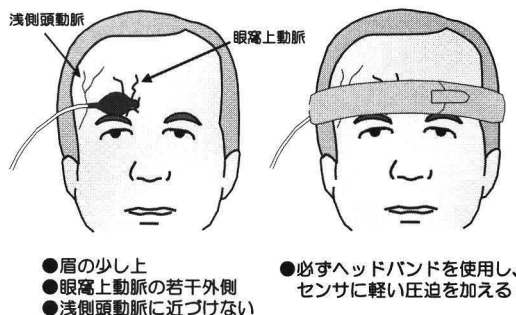


図 15 前額部センサの装着方法

額部の SpO₂ の平均遅延時間とは有意差はなかった (10.1 ± 5.4sec ; NS)。また SaO₂ との RSM-difference は前額部 (1.8 : ヘッドバンド使用) に対して耳朶 (5.2), 耳介 (5.0) は有意に大きく (P < 0.01), drop out も耳のみに認められ, 精度も前額部のほうが良好であった。

これらの研究結果は, 頭皮の栄養血管に由来する。図 14 は頭部の血管を表した解剖図で, 耳などのほとんどの頭皮は外頸動脈によって供給されているが, 前額部は内頸動脈から分岐する眼窩上動脈から供給されている。つまり, 脳を栄養する内頸動脈は血管収縮反応の影響を受けにくいので, 眼窩上動脈は低温に暴露されても脈拍振幅が小さくならないと考えられる。したがって, 低灌流状態などで末梢血管収縮を来した患者においては, 前額部での SpO₂ 測定が有効である可能性が示唆される。

3) 前額部センサの適応症例と注意点

(a) 適応症例

前述したとおり, 末梢血管収縮を生じていない場合, 前額部と手指でのディレイ・タイムは小さく, また脈拍振幅も手指のほうが大きいので, 通常は手指での測定が推奨される。前額部センサはあくまでも低灌流時, もしくはそのほかの理由で手指や足指での測定が困難な場合に有効であると考えられる。

(b) 装着部位とヘッドバンドの使用 (図 15)

前額部センサは眉の少し上, 発光部と受光部が眼窩上動脈の真上にならないように, 若干外側に装着する (しかし浅側頭動脈に近づけすぎてはな

らない)。さらに静脈のうっ血や浮腫などの影響を受けないように, ヘッドバンドの使用が推奨される。また, 脈拍の振幅を大きくとらえるためにもセンサの軽い圧迫が有効であるといわれている¹²⁾。さらに前額部センサは反射型であり, 従来の透過型センサに比べて外光や振動の影響を受けやすいため, ヘッドバンドによる固定が必要となる。

(c) 禁忌と注意事項

頭低位の場合, 静脈のうっ血による影響を受け, 低い測定値を表示する可能性があるため, ヘッドバンドの使用は必須で, 使用中も測定値に注意が必要であり, 特にトレンデレンブルグ体位での使用は禁忌である。また右心不全や三尖弁逆流, 頸静脈怒張などの症例も, 同様の可能性があるため注意が必要である。さらに大量の汗によってセンサが皮膚から浮いた状態になり, 測定が困難となる場合があるため, 装着前に清拭することが推奨され, 特に多汗症患者では禁忌である。

おわりに

パルスオキシメータが正確な測定を行うためには, 本体技術のみでなく, 患者情報をとらえるセンサが重要な要素であり, 本体の技術とセンサの技術が揃ってはじめて十分な能力を発揮する。NELLCOR は本体の最新技術を導入した結果, 低灌流時・体動時により正確で安定した SpO₂ の測定を可能とし, またセンサへのデジタルチップの内蔵により, 低灌流時に患者の変化をより早く測定可能な反射型の前額部センサも開発した。さら

に、このデジタルチップで新しいコンセプトのセンサ開発が容易になり、今後のパルスオキシメータの開発が加速されると考えられる。パルスオキシメータは、患者の安全を守るために、今まで以上に広い適応範囲で、医療従事者に正確な情報を提供することが期待される。

引用文献

- 1) Severinghaus JW and Naifeh KH : Accuracy of response of six pulse oximeters to profound hypoxia. *Anesthesiology* 67 : 551-558, 1987
- 2) Hamber EA, Bailey PL, James SW : Delays in the detection of hypoxemia due to site of pulse oximetry probe placement. *J Clin Anesth* 11 : 113-118, 1999
- 3) Bebout DE, et al : Site-dependent time delays in pulse oximetry monitoring. *Am J Respir Care Crit Care Med* 163 : A-142, 2001
- 4) Bebout DE, et al : Site-dependent differences in the time to detect changes in saturation during low perfusion. *Crit Care Medicine* 380 : S159, 2001
- 5) Hertzman AB, et al : Selective vascular reaction patterns in the nasal septum and skin of the extremities and head. *Am J Physiol* 127 : 671-684, 1939
- 6) Hertzman AB, et al : Reactions of large and small arteries in man to vasoconstrictor stimuli. *Am J Physiol* 130 : 56-62, 1940
- 7) Hertzman AB, et al : The relative responses of the dorsal metacarpal, digital and terminal skin arteries of the head in vasoconstrictor reflexes. *Am J Physiol* 134 : 59-64, 1941
- 8) Gopfert H, et al : Uber die Wirkung Gefabaktiver Substanzen auf den Peripheren Kreislauf Beim Menschen. *Arch Exper Path u Pharmacol* 195 : 93-116, 1940
- 9) Hertzman AB, et al : The absence of vasoconstrictor reflexes in the forehead circulation. effect of cold. *Am J Physiol* 136 : 692-697, 1942
- 10) Bebout DE, et al : Effects of cold-induced peripheral vasoconstriction on pulse amplitude at various pulse oximeter sensor sites. *ASA 2002 Annual Meeting Abstract #652774. Anesthesiology* 2002 (submitted)
- 11) Bebout DE, et al : Detection of hypoxemia during peripheral vasoconstriction at the radial artery and various pulse oximeter sensor sites. *Crit Care Med* 31 : A72, 2002
- 12) Dassel AC, Graaff R, Aardema M : Reflectance pulse oximetry at the forehead improves by pressure on the probe. *J Clin Monit* 11 : 237 - 244, 1995