

呼吸がプレシモグラムの波形に与える影響

心臓と肺は、様々な過程で生理学的な相互作用を持っている。心臓は胸腔内に位置し、そのポンプ機能は胸腔内の気道内圧、血圧、循環血液量の相対的变化による影響を直接受けている。¹ 正常な心臓ポンプ機能には、多くの因子が関わっているが、その中の一つに、胸腔内の気道内圧と血管内容量のバランス調節がある。正常呼吸時の胸腔内気道内圧の変化は、心臓のポンプ機能を実際に補助し、強化する。例えば、正常吸気時に胸腔内の陰圧が上昇すると、心臓への静脈還流量は増加する。この現象は、特に下肢からの静脈還流を促す。

循環血液量と気道内圧の関係が不均衡な状態になると、心臓のポンプ機能に変化が起こり、脈圧や容積脈波には呼吸に合わせた周期的変化が起こる。Lomar は 300 年以上前に行った発表で、収縮性心膜炎患者の容積脈波は吸気時に減少するというような生理学的事象に注目した最初の研究者であるとして、Khasnis² は功績を称えている。気道内圧と血管内圧または血管内容量の関係が不均衡になると、脈圧や容積脈波の呼吸性変動はより顕著に影響を受ける。胸腔内圧の変化は、左心・右心両方の充満と拍出の過程に直接影響を与える。心臓ポンプ容量の変化は、収縮期血圧・拡張期血圧の周期的変化として表れる。呼吸相に応じた血圧の大きな周期的変化は動脈血圧の継続的・観光的モニタリングによって把握することができる。

周期的な脈圧と容積脈波の変化は、末梢灌流の変化を招く。末梢灌流のフォトプレシモグラフィ(光電脈波)は、赤外線吸収波形から得られた脈波信号をパルスオキシメータに表示させることができる。この赤外線波形の変化は測定部の容積脈波の変化と強い相関関係が見られ³、また、パルスオキシメータに表示された脈拍毎のプレシモグラムは、測定部の脈拍毎の容積脈波の変化を表している。パルスオキシメータのプレシモグラムは容積変化を表し、動脈ラインの血圧記録は圧変化を表している。つまり、プレシモグラムの周期的変化は、同様に血圧の周期的変化を反映し、さらに、これらの変化は患者の血管内血液量の変化を反映すると言える。^{4,5} 前述したように、このような血圧とプレシモグラムの波形の周期的変化は、血管内容量に応じた胸腔内圧の変化によっても起こりうる。喘息は、胸腔内圧が非常に高い状態であり、顕著な周期的変化が生じている。Steele は血圧とパルスオキシメータのプレシモグラムの波形の周期的変化は、気道閉塞がある場合に起こり⁶、周期性波形の大きさと気道閉塞の重症度には相関関係があることを証明した。

臨床への応用

喘息が重症である場合、吸気終末時に気道抵抗の上昇が胸腔内圧の上昇を招き、静脈還流が一時的に減少する。その結果、脈圧の変動による心拍出量の減少が起こる。循環血液量が低下している場合は、呼吸が正常であっても血管内圧やその流量は少なく、しかも気道内圧の変化が比較的小さくても大きな影響を受け、その結果、心拍出量の周期的変化を招く。機械的換気を行っている場合は、気道内圧のパターンが逆になるので、この関係も逆になる。自発換気の場合は、空気は陰圧によって吸い込まれるのに対して、機械的換気の場合は陽圧によって押し込まれる。従って、機械的換気は著しく静脈還流を妨げ、心拍出量の周期的変動も増加する。

これらの周期的変化は生理学的変化によるもので、収縮期血圧変動、脈圧変動、デルタアップ/デルタダウン、呼吸波形変動など、様々な用語によって表現されている。

病状と生理機能に及ぼす影響

これまで、収縮期血圧変動 (SPV) は、従来の血圧測定用カフを用いて非観血的に測定するか、動脈圧ラインからの動脈圧を測定してきた。これらの方法は正常呼吸時の血圧変化を観察するために多大な労力を必要とする。各病状が重篤な場合、SPV の上昇は臨床上重要な兆候になると考えられる。(Table 1)

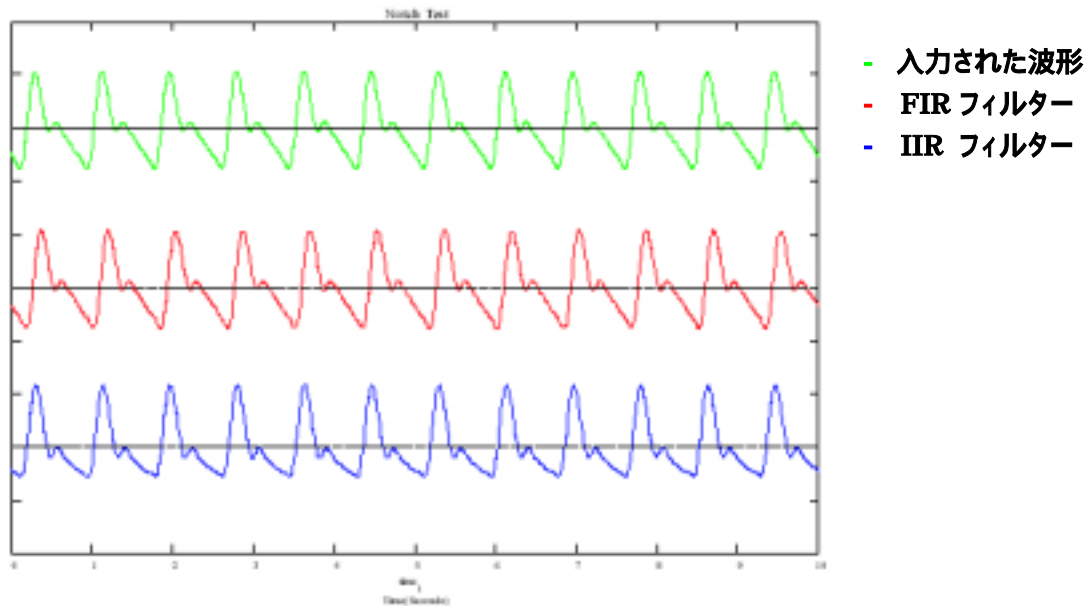
Table 1 収縮期血圧変動の上昇に関連する諸疾患²

心臓由来の疾患	心臓も肺も由来しない疾患	肺由来の疾患
心原性ショック	循環血液量低下	喘息
心タンポナーデ	敗血症性ショック	緊張性気胸
心嚢液貯留	アナフィラキシーショック	
収縮性心膜炎	横隔膜ヘルニア	
拘束型心筋症	上大静脈の梗塞	
肺塞栓症	極度の肥満	
急性心筋梗塞		

測定方法

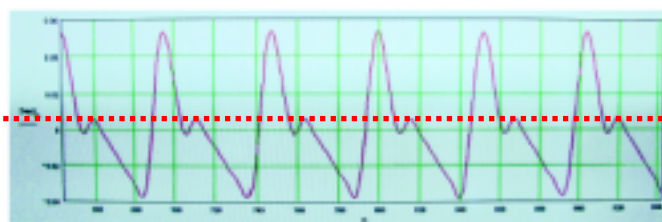
前述から鑑み、確実に継続的、非観血的にこれらの周期的変化を測定することは、臨床上有用である。プレシモグラフの波形から圧を定量化して表示する方法はないが、現時点では、多くの臨床医がパルスオキシメータのプレシモグラフの波形を、生理学的な周期的変化として捉えている。脈波の変動が増加している場合は、胸腔内・循環血液量の関係に変化が起きていると言える。残念ながら、各パルスオキシメータのメーカー間で、プレシモグラフの波形の表示方法は統一されていない。その理由として各メーカーが採用している環境による影響やその他のノイズを除去するためのフィルターの精度が挙げられる。あるフィルター技術は患者の生体信号をほとんど、あるいは全く形態を変えず表示するが、あるフィルターは本来の患者生体信号情報を大きく歪ませている可能性がある。(図1) マシモはハイエンドのデジタル信号処理チップを用いることで、Finite Impulse Response (FIR) という高性能のフィルターを導入することを可能としたが、これは波形の歪曲や不安定さなど従来のフィルターの問題点を解決したフィルターである。このフィルターの導入によって、患者の生体信号を忠実にプレシモグラフに再現することが可能となった。(図2)

(図1) 各フィルターの性能比較: FIRは入力された波形を忠実に再現しているが、IIRの波形は大きく歪曲していることが分かる



(図2) パルスオキシメータに表示されているプレシモグラフの波形の形状

Waveforms Displayed by Pulse Oximeters



脈拍数: 72 bpm
ノッチは真中から下降脚を示した波形

Figure 9. This depicts an input waveform at 72 bpm with notch at mid level of descending limb.



脈拍数: 72 bpm
上の波形と同様ノッチは真中から下降脚を示し、インテグリティは完璧である。

Figure 10. Photo of notched waveform at 72 bpm displayed by Masimo Radical in response to input signals shown in figure 9. Notice the notch appears at mid level and waveform integrity is excellent.

パルスオキシメータは、常時トレンドができる数式フォーマットを用いて、変化を表示する能力が求められる。この能力を装備できれば、生理学的にはわずかな変化でも、信頼性をもって表示できると考えられる。

マシモ社は、現在のパルスオキシメータやパルス CO オキシメトリ機器で既に用いている灌流指標(PI)を利用して、プレシモグラフに反映される生理機能の変化によって起こる周期的変化の測定方法(PI)

eth Variability Index)を開発した。

灌流指標(PI)の定義

灌流指標は数値としてパルスオキシメータに表示される。PI は、新生児の疾患の重症度を判断する際に有用であることが証明されてきた。^{7,8} PI が変動する要因は、硬膜外ブロック^{9,10}、痛覚刺激¹¹、交感神経緊張、末梢灌流の減少¹²など、多様である。パルスオキシメータで SpO₂を測定する場合には、赤色光と赤外光が用いられている。パルスオキシメータの信号からの一定量の光(DC)は、皮膚やその他の組織に吸収され、血液は非拍動性である。一方、量に変動のある光(AC)は、拍動性の動脈血に吸収される。PI は、赤外光信号の拍動性と非拍動性の比率を算出し、パーセンテージで表す(方程式 Equation 1)。赤外光信号が用いられるのは、赤色光信号よりも動脈血酸素飽和度の変化による影響を受けにくいからである。

図1)

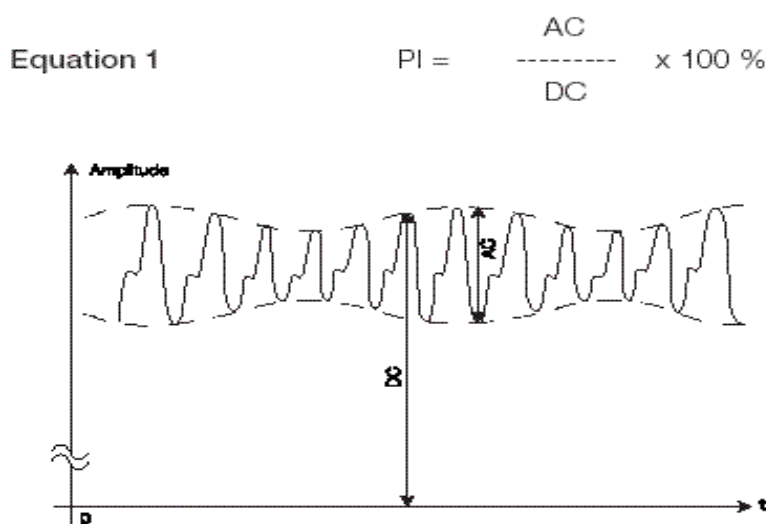


図1. 図示した赤外光信号は、パルスオキシメータ内で処理されたものである。AC はモニター画面に表示された透過率の変化を表しており、この変化は心拍動周期に応じた循環血流量の変化によって起こる。DC は、色素、組織、骨、心拍動の拡張期にみられる非拍動性血液による透過率である。

脈波変動指標(PVI)の定義

脈波変動指標(PVI)は、呼吸周期に合わせて起こるPIの動的変動を測定し比率で表している(方程式 Equation 2)。PVIは、1回かそれ以上の完全な呼吸周期があった区間のPIの変化を測定し算出される。

Equation 2

$$PVI = \frac{PI_{Max} - PI_{Min}}{PI_{Max}} \times 100 \%$$

従って、PVIはパーセンテージで表示される。PVIの数値が低いほど、呼吸周期に応じたPIの変動が

少ないことを表す。

PVI の臨床での実用化に向けて

PVI は、胸郭内の気道内圧と血管内血流量のバランスの変化に関して有益な情報を生み出す可能性を持っている。例えば、PVI は喘息発作の重症度や適切な治療に対する反応を監視するために利用される。また、PVI は、プレシモグラフの波形に見られる周期的変化を示す数値であるため、患者の臨床症状を容易にトレンドすることができる。PVI のトレンドは、手術中・手術後の患者を監視し、輸液管理が適切かどうかチェックするのに役立つ。例えば、PVI が上昇している場合は、循環血液量の低下が示唆される。また、PVI のトレンドは呼吸不全や心不全の患者の監視にも役立ち、胸腔内圧と心機能の相互関係を評価する際の助けとなる。この関係を継続的に示すことができれば、PVI の非観血的モニタリングは、殆ど全ての入院患者にとって必要不可欠なものとなるであろう。

参考文献：

1. Barach P. Pulsus Paradoxus. *Hospital Physician* 2000;49-50
2. Khasnis A, Lokhandwala Y. Clinical signs in medicine: pulsus Paradoxus. *J Postgrad Med* [serial online] 2002[cited 2006 May 3]; 48:46-9. Available from: <http://www.jpgmonline.com/article.asp?issn=0022-3859;year=2002;volume=48;issue=1;spage=46;epage=9;aulast=khasns>.
3. Dorlas JC, Nijboer JA. Photo-electric Plethysmography as a monitoring device in anaesthesia. Application and interpretation. *Br J Anaesth* 1985; 57(5):524-30.
4. Partridge BL. Use of pulse oximetry as a noninvasive indicator of intravascular volume status. *J Clin Monit* 1987;3(40):263-8
5. Sharnir M, Eidelman LA, et al. Pulse oximetry plethysmographic waveform during changes in blood volume. *Br J Anaesth* 1999; 82(2):178-81.
6. Steele DW, Wright RO, et al. Continuous noninvasive determination of pulsus paradoxus; a pilot study. *Acad Emerg Med* 1995; 2(10):894-900.
7. De Felice C, Del Vecchio A, et al. Early postnatal changes in the perfusion index in term newborns with subclinical chorioamnionitis. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed* 2005; 90(5): F411-4.
8. De felice C, Latini G, et al. The pulse oximeter perfusion index as a predictor for high illness severity in neonates. *European Journal of Pediatrics* 2002; 161:561-2.
9. Kakazu CZ, Chin B-J, Kwan W-F. Masimo SET technology using perfusion index is a sensitive indicator for epidural onset. *Anesthesiology* 2005; 103:A576.
10. Uemura A, Yagihara M, Miyabe M. Pulse oximeter perfusion index as a predictor for the effect of pediatric epidural block. *Anesthesiology* 2006; 105:A1354.
11. Hager H, Church S, et al. The perfusion index measured by a pulse oximeter indicates pain stimuli in anesthetized volunteers. *Anesthesiology* 2004; 101:A514.
12. Graybeal JM, Petterson M, Novak J. Correlation of peripheral perfusion index with site to site delays in detection of desaturations. *Anesthesiology* 2002; 96:A595.