

呼吸と循環の裏表

— モニタリングから呼吸と循環の関連を理解する —

薊 隆 文

要 約

呼吸と循環は相互に密接に関連しあっている。そのため、患者さんを評価する際には、病態・モニター・治療のそれぞれにおいて、呼吸だけ・循環だけでは重要なことを見落とすおそれがある。呼吸の変動を利用した循環のモニターの原理と循環の変動を呼吸のモニターから読み取ることの原理から、呼吸と循環を同時に評価することの重要性を説明した。モニターの値を鵜呑みにするのではなく、その値が表示されることの意味を知ることができることで、患者さんの管理もより有効に、より興味を持てるようになることを期待する。

キーワード：呼吸、循環、モニタリング、酸素化能、心拍量

はじめに

急性左心不全の主な症状は肺水腫による呼吸困難である。肺性心は慢性閉塞性肺疾患など肺の疾患が原因で右心不全をきたすものである。血圧はもちろん循環の指標・モニターであるが、じつは呼吸の影響を考慮する必要がある。呼気終末陽圧（PEEP）をかけて呼吸の治療を行うと血圧が低下するのは、呼吸の治療が循環に影響することを示している。このように、肺と心臓、言い換えると呼吸と循環は相互に密接に関連しあっている。患者さんを見る時にも、病態・モニター・治療のそれぞれにおいて、呼吸と循環が密接に関連しているため、呼吸だけ・循環だけを見るのでは重要なことを見落とすことがある¹⁾。本稿では、呼吸の変動を利用した循環のモニターの原理、また循環の変動を呼吸のモニターから読み取ることの原理などから、呼吸と循環を同時に見ることの重要性を説明する。

これまで当然のこととして見てきた呼吸・循環に関する、病態・モニター・治療などを相互関係の観点から見直してみると、呼吸あるいは循環を評価するときに、同時にもう一方も評価する必要があることが理解できるであろう。

1. 呼吸が循環に影響している例

1) 「過換気で肺血管は拡張し、脳血管は収縮する」

呼吸管理が循環に影響している例である。

血管がPaCO₂によって収縮したり、拡張したりすることはよく知られている。脳血管はPaCO₂が上昇する

と拡張する。脳圧は上がり、頭痛を感じる。反対に低下すると収縮する。脳圧は下がるが、あまり低下すると、脳血流が過度に減少して、目の前が真っ白になる。

一方、肺血管は脳血管と反対の反応を示す、PaCO₂が上昇すると収縮し、低下すると拡張する。このことは、換気が十分な（酸素がたくさん供給される）肺胞に血流を多く送ろうとする目的にかなった反応である。この反応は先天性心疾患の管理に利用されている。先天性心疾患の管理は肺血流の管理と言っても過言でない、心室中隔欠損症のように肺血流が増加している場合と、ファローの四徴症のように肺血流が減少している疾患に分類すると分かりやすい。呼吸管理によって、肺血流の増大している疾患にはPaCO₂を上昇させて肺血流を減少させ、反対に肺血流の低下している疾患にはPaCO₂を低下させて肺血流を増大させたりすることができる。つまり、呼吸を変化させることで循環を管理するのである。この時には、モニターを見ながら呼気終末二酸化炭素分圧（PETCO₂）を変化させて、肺血流の変化を動脈血酸素飽和度（SpO₂）で評価する。

2) 「PEEP をかけたら酸素化が改善したけど血圧が低下した」

これも、呼吸管理が循環に影響している例である。

PEEPの利点は無気肺や肺水腫のときに肺胞に陽圧をかけて肺の虚脱を改善させたり水を追い出したりすることで酸素化能を改善させる。集中治療領域では広く行われている療法である。欠点としては血圧低下をきたすこ

とである。胸腔内の陽圧の増大によって静脈還流が低下するためである。特に循環血液量が減少している患者さんでは、酸素化改善のためにSpO₂だけを見ていると驚くほど血圧が低下する（図1）。

3) 「Stroke Volume Variation (SVV) が大きいと輸液が必要である」

呼吸の影響を循環のモニターに利用している例である。最近の新しい循環管理のモニターとしてSVV（一回拍出量変動）がある。人工呼吸中の観血的動脈圧の呼吸性変動を利用したものである。かなり前から人工呼吸中の観血的動脈圧は循環血液量が少ない患者さんで大きく変動することは知られていた。これを数値で表し、輸液管理に利用するものである。吸気時には胸腔内圧が高まり肺胞内も陽圧となるため、肺胞周囲の血管内の血液を左房に押し出す効果がある。これは一時的に左房に輸液をすることと同じと考えてよい。このことをスターリングの心機能曲線に応用している。

スターリングの曲線を見てみよう（図2）。横軸は左心室の充満度、言い換えると輸液量を表し、縦軸は左心室の収縮力、言い換えると心拍出量を表す。つまり、輸液をすると心拍出量は増大する。しかし、この曲線は次第にプラトーに達するため、同じ輸液量であっても右に行くほどその効果は少なくなる。さて、SVVで、血圧の呼吸性の変動の大きい患者さんというのは、呼吸のたびに1回拍出量の変動が大きい患者さんということになる。すなわち、この曲線の左方に位置する患者さん、輸液をすれば心拍出量の増大する患者さんということになり、循環安定化のために輸液が妥当であることが示唆される²⁾。

2. 循環が呼吸に影響している例

1) 「心電図から呼吸数がわかる」

循環のモニターを利用して同時に呼吸をモニターしている例である。

最近呼吸数はカプノメータで測定することが多くなったため、心電図だけ着けている患者さんのモニターに呼吸数が表示されていることを忘れてしまう方も多と思う。呼吸によって胸部誘導の電極間の距離が変化するため、この間の抵抗に変化が生じる、この抵抗の変化から呼吸数を計測しているのである。

2) 「換気を変えていないのに、突然呼気終末二酸化炭素分圧 (PETCO₂) が低下した」

循環（肺血流）の変動が呼吸のモニターで検知できる例である。

通常、PETCO₂はPaCO₂を反映する。これは、以下

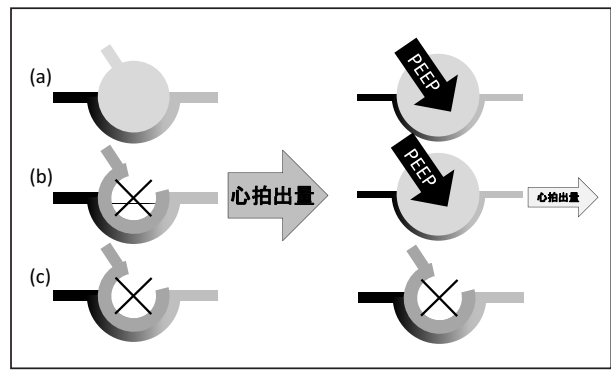


図1 PEEPの利点と欠点

(b)では虚脱していた肺胞が一部開通し、肺内シャントが減少、酸素化能は改善し、動脈血酸素濃度が上昇する。
 (a)・(b)では肺胞内圧が上昇し、静脈還流が減少し、血圧が低下する。
 (c)では肺胞が開通しないため、PEEPはかからず、血流量は保たれる。

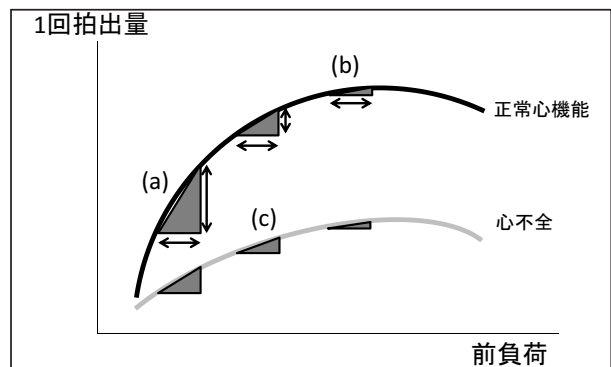


図2 スターリングの曲線によるSVVの原理の説明

横軸の変化は呼吸による肺血管から左房への輸液負荷に相当する
 (a)では吸気時の肺血管からの左房への還流増大によって1回拍出量が大きく増大している、このため血圧は大きく変動する。
 (b)では拍出量に変化がない、つまり、呼吸による血圧の変動がない、すでに循環血液量が十分に前負荷も十分な状態である。
 (c)では循環血液量（前負荷）がもともと少ないにもかかわらず、拍出量の変化は少ない、これは心不全のためである。

に示す肺胞換気式から明らかである。

$$PETCO_2 \approx PaCO_2 \times VCO_2 / VA \quad (\text{肺胞換気式})$$

(VCO₂: 1分間のCO₂産生量、VA: 肺胞換気量)

CO₂産生量 (VCO₂) が一定の状態ではPETCO₂は肺胞換気量 (VA) と反比例する。しかし、換気量を全く変えていないのに、PETCO₂が大きく変動することがある。この時は肺胞換気式から何が起きているのかを予測することはできない。このようなことが生じる病態の一つの例が肺塞栓である。肺塞栓が生じると、この部分は換気があっても血流がない肺胞死腔となる。この部分の呼気にはCO₂が含まれないため口元でCO₂濃度を希釈する効果が生じる。そのためPETCO₂は低下し、PaCO₂との較差が大きくなる（図3）。

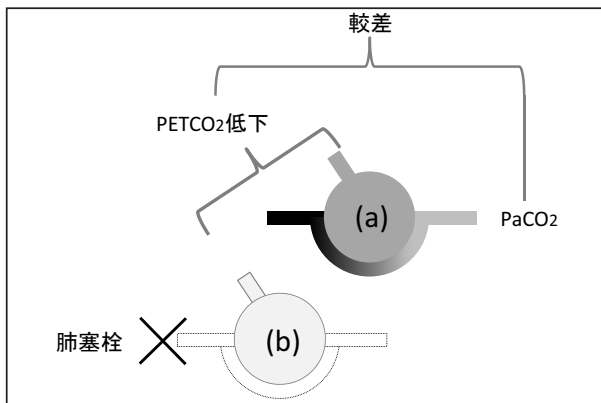


図3 肺塞栓によるPETCO₂低下

肺塞栓では(b)のように肺胞死腔が増大する、PETCO₂は肺胞死腔からのCO₂を含まない呼気で希釈される。
PaCO₂は(a)の血流のある肺胞のPCO₂と同じになるため、PETCO₂とPaCO₂に較差が生じる。

3) 「PEEP をかけたら SpO₂ が低下した」

呼吸管理が循環に影響し、さらに再び呼吸に影響している例である。

これは少し複雑である。PEEP の欠点の一つは胸腔内圧の上昇にともなう血圧低下であることはすでに説明した。静脈還流量が低下し心拍出量が低下するためである。そもそも、低酸素血症の原因の大多数を占めるのは無気肺や肺水腫による肺内シャントの存在である。酸素化されずに左房に還流する静脈血が PaO₂ を低下させるのである。PEEP をかけすぎるとこの静脈血の酸素含量が低下して、この低下の程度によっては肺内シャントの改善による PaO₂ の上昇を打ち消し、さらにはかえって低下させてしまうことがある。

静脈血の酸素含量は、以下の式であらわされる

$$VO_2 = (CaO_2 - CvO_2) \times CO$$

(VO₂ : 酸素消費量、CaO₂ : 動脈血酸素含量、CvO₂ : 静脈血酸素含量、CO : 心拍出量)

この式は、以下のように書き換えられる。

$$CvO_2 = CaO_2 - VO_2 / CO$$

ここで、

$$CaO_2 = 1.34 \times SaO_2 \times Hb + 0.0031 \times PaO_2$$

(SaO₂ : 動脈血酸素飽和度)

と表され、また SaO₂ は PaO₂ に依存する。この式から、PEEP で酸素化能が改善し CaO₂ が増大しても CO が下がれば全体として CvO₂ は低下する可能性があることがわかる。

ここで、

$$CvO_2 = 1.34 \times SvO_2 \times Hb + 0.0031 \times PvO_2$$

(SvO₂ : 混合静脈血酸素飽和度)

と表される。そして、この酸素含量の低下した静脈血が左房で混合することで PaO₂ を低下させてしまうのであ

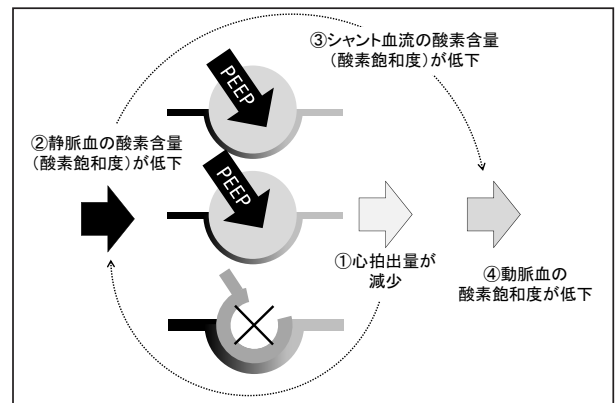


図4 PEEPによるSpO₂の低下

心拍出量が減少する(①)と、静脈血の酸素含量(酸素飽和度)が低下する(②)。
シャント血流の酸素飽和度は静脈血の酸素飽和度なのでこの部分の酸素飽和度が低下する(③)。
酸素飽和度の低下したシャント血流の混合によって動脈血の酸素飽和度が低下する(④)。

る³⁾(図4)。このような呼吸も循環も不安定な場合には SpO₂ と同時に SvO₂ もモニターし酸素化能と心機能の両方を評価すると有用である。

3. 循環を評価するのに呼吸を考慮することが同時に必要な例

「循環」を一言で表現すると、それは「酸素の流れ」すなわち酸素の運搬である。酸素の運搬がなされるためには、まず呼吸による酸素の取り込みがなされていることが前提である。血圧が循環のモニターであることを否定する医療者はほとんどいないであろう。しかし、血圧がどうして酸素の流れを表すことができるのだろうか？ 以下に「血圧が良ければ循環が良い」と言えるための条件を、呼吸の評価が必要であることを含めて解説する。

$$\text{血圧} = \text{血流} \times \text{末梢血管抵抗}$$

である。ここで、

$$\text{血流} = \text{心拍出量}$$

であるため、条件①として、「末梢血管抵抗が変わらなければ、血圧は心拍出量を反映する」すなわち

$$\text{血圧} \propto \text{心拍出量} \quad (a)$$

ということが出来る。

つぎに、酸素の流れとは酸素運搬量(DO₂)のことであり、

$$DO_2 = CaO_2 \times CO$$

と表される。ここで、

$$CaO_2 = 1.34 \times Hb \times SaO_2 + 0.0031 \times PaO_2$$

であるため、

$$DO_2 = (1.34 \times Hb \times SaO_2 + 0.0031 \times PaO_2) \times CO$$

となって、酸素の運搬は、Hb、SaO₂、そして心拍出量(CO)に依存することがわかる。Hbを酸素を運ぶトラッ

くに、心拍出量をトラックのスピードに例えてみると理解しやすいであろう。ここで、酸素の多寡は肺の酸素化能をあらわしている（図5）。そこで条件②として、「酸素化（SpO₂）が良ければ、Hbが十分であれば、心拍出量は酸素運搬量を反映する」すなわち、

$$\text{心拍出量} \propto \text{酸素運搬量} \quad (\text{b})$$

ということができる。

そこで、①、②の条件がともに満たされれば、(a)、(b)を併せて、

$$\text{血圧} \propto \text{酸素運搬量}$$

となり、血圧が酸素運搬量、「酸素の流れ」を反映することになる。

われわれが血圧を測って循環を評価しているとき、無意識のうちに末梢血管抵抗が高くなく、酸素化能が良好で、そしてHbも十分であるという前提に立っているのである。実際に患者さんをみる時は、Hbの値を把握し、呼吸状態を、あるいはパルスオキシメータの値をちらりと見て、そして手を触って冷たくないことを確認する必要がある。このちょっとした配慮に時間は取られない、是非ともこのような「くせ」をつけてほしいと思う。

おわりに

呼吸と循環の深い関係について述べた。呼吸と循環が互いに影響を及ぼしあっていること、そしてまた、それをモニターとして利用していることを理解してほしい。モニターの値を鵜呑みにするのではなく、その値が表示されることの意味を知ることができれば、患者さんの管理もより有効に、より興味を持てるようになるであろう。呼吸と循環を同時に評価することで、急変時の発見の遅れ、治療開始の遅れが減少することを期待したい。

文 献

- 1) 外須美夫：麻酔・集中治療のための呼吸・循環のダイナミズム，13-14，真興交易（株）医書出版部，東京，2011.
- 2) Michard F. : Changes in arterial pressure during mechanical ventilation, *Anesthesiology.*, 103(2), 419-28, quiz 449-5. Review. 2005.
- 3) Dennehy KC, Dupuis JY, Nathan HJ, Wynands JE. : Profound hypoxemia during treatment of low cardiac output after cardiopulmonary bypass, *Can J Anaesth.*, 46(1), 56-60, 1999.

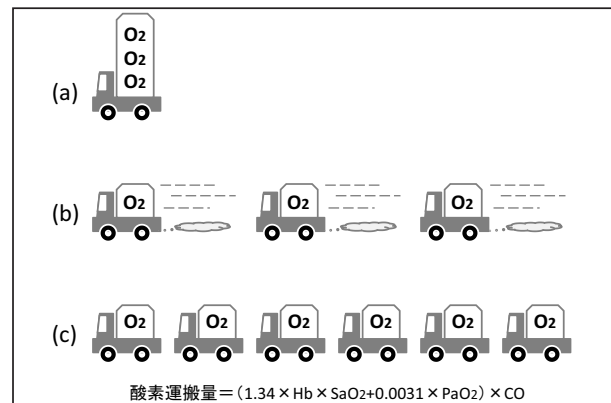


図5 酸素運搬量

酸素の運搬を増やすためには

(a) 1台にたくさん積む

⇒十分酸素が供給される⇒酸素化能(PaO₂)が良い

(b) 回転を増やす ⇒心拍出量(CO)が維持されている

(c) トラックの台数を増やす ⇒Hbが十分にある

Interaction between Respiration and Circulation of the Patients

— Understanding Respiration and Circulation through Monitoring —

Takafumi Azami

Laboratory of pathophysiology (anesthesiology), Nagoya City University School of Nursing

Abstract

Circulation is closely related to breathing mutually. In reading monitors, taking care of patients, and thinking of pathophysiology, evaluating breathing only or circulation only might make nurses overlook important things. I explained the importance of evaluating both of breathing and circulation, through the principle of circulatory monitors using a change of breathing and through that of reading a circulatory change from a monitor of the breathing. If not only accepting the displayed value of the monitor but also understanding the meaning of the value, the management of a patient is sure to become not only more effective but also more interesting.

Key Words: breathing, circulation, monitoring, oxygenation, cardiac output