

## 特集

## 呼吸管理における最近のモニタリング

陽圧換気による循環モニタリングへの影響とその応用：  
PPV、SVV および PVI などの動的モニタリングを中心に

公文啓二

キーワード：陽圧換気，循環モニタリング，PPV，SVV，PVI，輸液反応性

## I. はじめに

陽圧換気による循環への影響は、主に胸腔内圧の変動によるものである。循環モニタリングの手法としては、従来から用いられている中心静脈圧（CVP）、動脈圧（AP）、肺動脈圧（PAP）、肺動脈楔入圧（PAOP）、上（下）大静脈径などの静的モニタリングと、陽圧換気に伴う胸腔内圧の周期的変動を反映する動的モニタリングがある。本稿では陽圧換気による循環モニタリングへの影響と応用について、動的モニタリングを中心に概説する。

## II. 陽圧換気による循環への影響

## 1. 静的モニタリング

陽圧換気による静的モニタリングへの影響は、通常肺胞圧の上昇に伴い PAOP、PAP は上昇し、胸腔内圧の上昇によって CVP は上昇するが、静脈還流量の減少によって血圧は低下すると考えられる。圧受容体の反応によって末梢血管抵抗が増し、血圧は低下しない場合もある。

## 2. 胸腔内圧周期変動

陽圧換気に伴う胸腔内圧の周期的変動は、静脈還流・肺血管抵抗・肺血管床から左房への血液移動・左室 transmural pressure の変動に伴う左室後負荷の変動

など循環に対して様々な影響を及ぼす。すなわち、吸気時の胸腔内陽圧は肺血管抵抗を増し静脈還流は減少するが、胸腔内圧の上昇によって肺血管床から左房への血流は増加する（左室前負荷の増加）とともに、左室 transmural pressure の低下による左室後負荷軽減効果によって一回拍出量（stroke volume:SV）は増加、血圧の上昇が起きる。呼気時には SV の減少および収縮期圧の低下が生じる（図 1）<sup>1~4)</sup>。これらの陽圧換気の血行動態への影響は、心・循環系あるいは肺の状態や病変によって異なってくる。

## 3. 低酸素性肺血管攣縮の解除

単に陽圧が加わるのみであれば肺胞血管を圧迫し肺血管抵抗は増加するが、低酸素状態の患者に呼気終末陽圧（positive end-expiratory pressure: PEEP）や陽圧換気を開始した直後に、低酸素性肺血管攣縮（hypoxic pulmonary vasoconstriction: HPV）が解除されれば肺血管抵抗は低下し、右室後負荷の軽減・左室前負荷の増加に伴い SV が増加する<sup>5,6)</sup>。図 2 にはそのような事象と推定された自験例を示した。

## III. 動的モニタリングについて

動的モニタリングとは、陽圧換気に伴う循環変動をモニタリングする手法である。観血的動脈圧モニタリングによる陽圧換気サイクルに伴う動脈圧の変化や、パルスオキシメータの振幅の呼吸性変動をモニタリングする方法がある（表 1）<sup>7~9)</sup>。

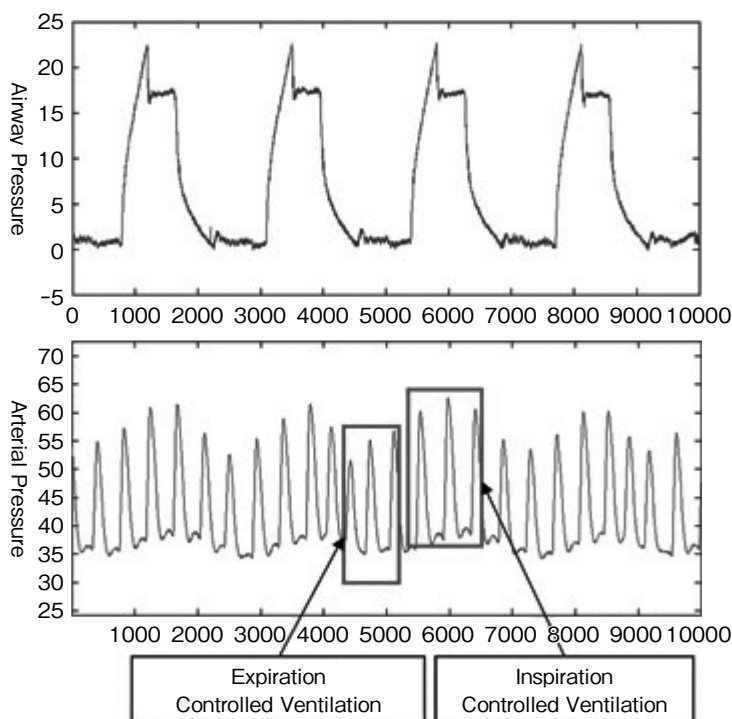


図1 陽圧換気に伴う動脈圧の変動 (Edwards Lifesciences 社ホームページより<sup>4)</sup>)  
吸気で上昇し呼気で低下する

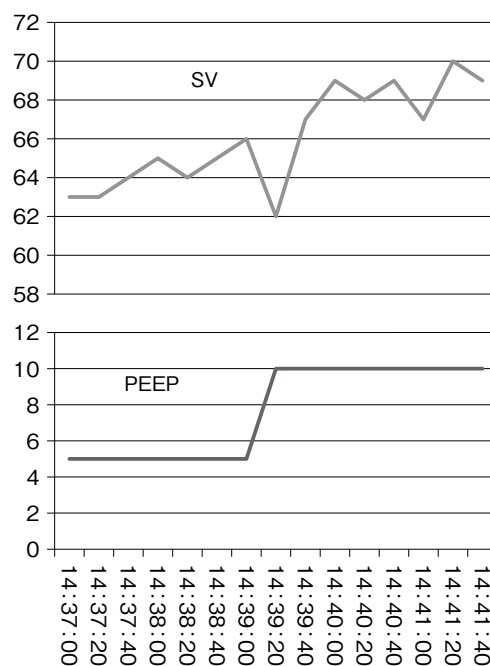


図2 PEEP を上げた後に増加した SV

PEEP を上げた時点で SV が増加している。これは PEEP を上げることによって低酸素性肺血管攣縮が解除され肺血管抵抗は低下し左室前負荷が増大し SV が増加したと推定される (自験例)

### 1. 脈圧変動 (pulse pressure variation : PPV)

PPV は動脈ラインから得られた脈圧 (pulse pressure : PP) の呼吸性変動で

$$PPV(\%) = [(PP_{\max} - PP_{\min}) / PP_{\text{mean}}] \times 100$$

の値をモニタリングしているものである (図3下)。

### 2. 一回拍出量変動 (stroke volume variation : SVV)

SVV は FloTrac™ (Edwards Lifescience 社製) の動脈圧波形情報から求められた SV の 20 秒間の呼吸性変動を下記の式で算出しモニタリングしているものである (図3上)。

$$SVV(\%) = [(SV_{\max} - SV_{\min}) / SV_{\text{mean}}] \times 100$$

測定精度に関しては調節呼吸であること、呼吸数は一定、一回換気量は 8 ~ 12mL/kg、換気回数は 8 ~ 12 回、PEEP は 10cmH<sub>2</sub>O 以下であることなどが前提条件とされている。

### 3. パルスオキシメータの脈波変動指標 (pleth variability index : PVI) (図4)

PVI はパルスオキシメータの振幅の呼吸性変動を示すもので、

$$PVI(\%) = [(PI_{\max} - PI_{\min}) / PI_{\max}] \times 100$$

表1 陽圧換気下の主な動的モニタリング

脈圧変動 (pulse pressure variation : PPV)
一回拍出量変動 (stroke volume variation : SVV)
脈波変動指標 (pleth variability index : PVI)

$$PI(\%) = [(\text{拍動性信号 AC}) / (\text{無拍動性信号 DC})] \times 100$$

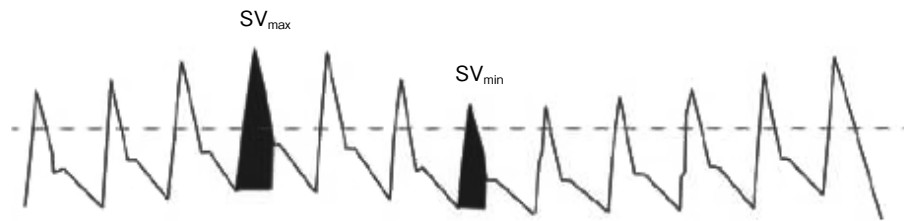
灌流指標の呼吸性変動が数値化されたものである。

## IV. 動的モニタリングの応用

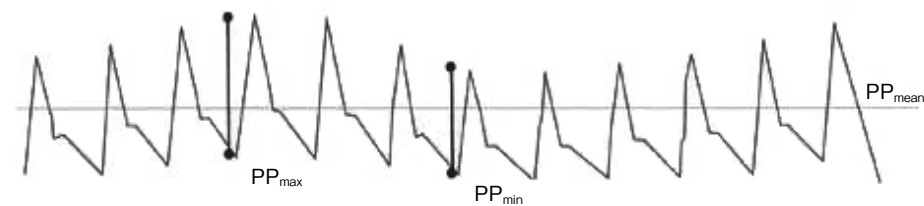
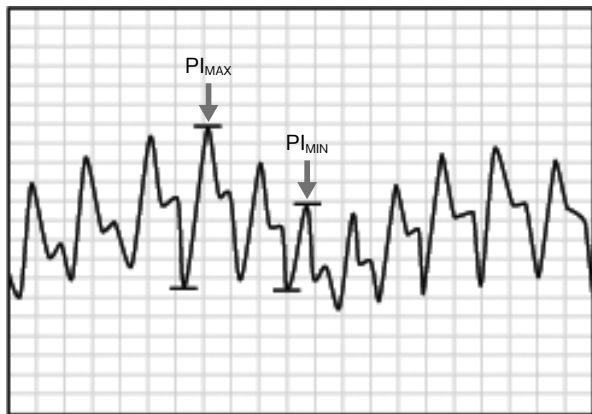
陽圧換気下の動的循環モニタリングの応用として最も注目されていることは、輸液への反応性の予測指標になるという点である。陽圧呼吸の呼吸周期に伴う SVV、PPV あるいは PVI の値が大きい、すなわち一回拍出量や脈圧の変動が大きい状態では輸液反応性が良いと考えられる。一方、その変動が少ない状態、すなわち SVV、PPV あるいは PVI の値が小さい場合には輸液による血行動態の改善は期待できない状態と考えられる (図5)。

輸液反応性に関して、各種病態に関する報告や systemic review が数多く報告されており、そのカッ

SVV-Stroke Volume Variation



PPV-Pulse Pressure Variation

図3 Stroke Volume Variation (SVV) と Pulse Pressure Variation (PPV)<sup>10)</sup>

$$PVI = \frac{PI_{MAX} - PI_{MIN}}{PI_{MAX}} \times 100$$

図4 パルスオキシメータの脈波変動指標 (pleth variability index : PVI)

Perfusion Index (PI) is the ratio of nonpulsatile to pulsatile blood flow through the peripheral capillary bed. PVI is an automatic measure of the dynamic change in PI that occurs during the respiratory cycle. The greater the PVI, the more likely the patient will respond to fluid administration. [http://www.masimo.co.jp/pvi/clinical\\_evidence.htm](http://www.masimo.co.jp/pvi/clinical_evidence.htm)

トオフ値に関して議論がなされている<sup>11~17)</sup>。

呼吸状態の安定している患者で SVV のカットオフ値を 13% とすると、それ以上の場合には輸液を行うメリットがあること<sup>12, 13)</sup>や、PPV のカットオフを 13% にすると輸液への反応性の有無は陽性適中率 94%、陰性適中率 96% であったという review<sup>14)</sup>、あるいは Marik ら<sup>15)</sup>の systemic review では輸液後反応性は PPV や

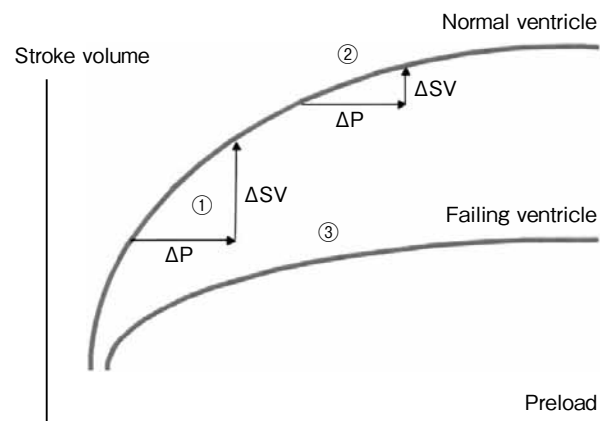


図5 Frank-Starling 曲線 (文献3) より引用)

①カーブの急峻な部分に位置すれば前負荷の増加に対する  $\Delta SV$  (SVV) は大であり容量負荷に対する反応性は良好であるが、②あるいは③のカーブの緩やかな部分では前負荷の増加に対する  $\Delta SV$  (SVV) は小さく、容量負荷をしても SV の増加は期待できない。

SVV では優れており PPV の閾値を 12.5% とすると、感度 89%、特異度 88%、オッズ比 59.86 であり、SVV の閾値を 11.6% とすると、感度 82%、特異度 86%、オッズ比 27.34 で輸液への反応性を予測できる、などの報告がなされている。

Cannesson ら<sup>16)</sup>による、膠質液 500mL を 10~20 分で投与した容量負荷後に 15% 以上 CO が増加した場合を responder と定義したグレーゾーンアプローチを用いた PPV の輸液反応性に関する多施設共同研究の報告では、輸液反応性を予測する PPV の receiver operating characteristic (ROC) 曲線下面積は 0.89 で

CVP (0.57) よりも有意に大きく、輸液反応性を予測するうえで PPV が CVP より優れていることが明確に示された。一方、PPV が 9～13% の間（グリーゾーン）では輸液反応性の予測精度が落ち、25% の患者がそれに相当したとの結果で、容量負荷に反応したものは PPV がグリーゾーン下限以下の場合には 11% で反応者の CO の増加量（中央値）は 19%、グリーゾーンで反応したものは 50% で CO の増加量は 24%、グリーゾーン上限以上では 91% が反応し CO の増加量は 30% であったと報告している。

Michard ら<sup>17)</sup> は、PPV は単に輸液反応性の指標に留まらず、急性呼吸不全患者における PEEP やリクルートメント手法に伴う血行動態の不安定性を予測する指標として、肺水腫患者に対して過度の輸液の制限あるいは枯渇を予防する点や、透析治療を行っている重症患者において過剰な限外濾過を予防することなどに有用であり、また手術室において PPV に基づく goal-directed 輸液治療は高リスク手術患者の予後を改善する可能性があるとしている。

動的モニタリングは、肺保護戦略の低換気量の状態では輸液反応性の指標として制限があるとされていたが、Freitas ら<sup>18)</sup> は、重篤な septic shock の状態にあり、一回換気量 6mL/kg で機械換気を受けている 40 人の患者を対象とした研究で、PPV の ROC 曲線下面積は 0.91 とかかる低換気量状態でも PPV は優れており最良のカットオフ値は 6.5% であったと報告している。

Suehiro ら<sup>19)</sup> は気道圧開放換気（airway pressure release ventilation：APRV）下の 80 人を対象とした容量負荷に関する検討で、SVV の ROC 曲線下面積は 0.793 で、反応者と非反応者のカットオフ値は 14% で感度 78.9%、特異度 64.3% で輸液反応性の指標として許容できるものであることを報告している。

また、肺高血圧の存在した状態ではこれらの動的モニタリングの変動は乏しいことが示されているが<sup>20, 21)</sup>、この変動が乏しいことは逆に肺高血圧症や右心不全を疑い、さらなる精査を進める診断補助として応用できるのではないかという提言<sup>22)</sup>もある。

## V. おわりに

陽圧呼吸による循環モニタリングへの影響とその応用について、動的モニタリングを中心に概説した。これらのモニタリングは輸液反応性の予測指標としてそ

の有用性が実証されているが、換気条件や病態に影響されることにも留意して活用すべきである。

本稿の著者には規定された COI はない。

## 参考文献

- 1) Luce JM : The cardiovascular effects of mechanical ventilation and positive end-expiratory pressure. JAMA. 1984 ; 252 : 807-11.
- 2) Pinsky MR : Cardiovascular issues in respiratory care. Chest. 2005 ; 128 : 592S-7S.
- 3) Michard F : Changes in arterial pressure during mechanical ventilation. Anesthesiology. 2005 ; 103 : 419-28.
- 4) White paper : Stroke volume variation. Edwards Life-sciences [http://ht.edwards.com/resourcegallery/products/mininvasive/pdfs/stroke\\_volume\\_variationpdf.pdf](http://ht.edwards.com/resourcegallery/products/mininvasive/pdfs/stroke_volume_variationpdf.pdf)
- 5) Canada E, Benumof JL, Tousdale FR : Pulmonary vascular resistance correlates in intact normal and abnormal canine lungs. Crit Care Med. 1982 ; 10 : 719-23.
- 6) Dawson CA, Grimm DJ, Linehan JH, et al : Lung inflation and longitudinal distribution of pulmonary vascular resistance during hypoxia. J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol. 1979 ; 47 : 532-6.
- 7) Fujita Y, Sari A, Yamamoto T : On-line monitoring of systolic pressure variation. Anesth Analg. 2003 ; 96 : 1529-30.
- 8) Auler JO Jr, Galas F, Hajjar L, et al : Online monitoring of pulse pressure variation to guide fluid therapy after cardiac surgery. Anesth Analg. 2008 ; 106 : 1201-6.
- 9) Cannesson M, Attouf Y, Rosamel P, et al : Respiratory Variations in pulse oximetry plethysmographic waveform amplitude to predict fluid responsiveness in the operating room. Anesthesiology. 2007 ; 106 : 1105-11.
- 10) Pulsion Medical Systems : Volume responsiveness—Stroke Volume Variation (SVV), Pulse Pressure Variation (PPV) <http://www.pulsion.com/international-english/critical-care/parameter/svv-ppv/>
- 11) Reuter DA, Kirchner A, Felbinger TW, et al : Usefulness of left ventricular stroke volume variation to assess fluid responsiveness in patients with reduced cardiac function. Crit Care Med. 2003 ; 31 : 1399-404.
- 12) Hofer CK, Senn A, Weibel L, et al : Assessment of stroke volume variation for prediction of fluid responsiveness using the modified FloTrac and PiCCOplus system. Crit Care. 2008 ; 12 : R82.
- 13) Cannesson M, Musard H, Desebbe O, et al : The ability of stroke volume variations obtained with the Vigileo/FloTrac system to monitor fluid responsiveness in mechanically ventilated patients. Anesth Analg. 2009 ; 108 : 513-7.
- 14) Aular JO Jr, Galas FR, Sundin MR, et al : Arterial pulse pressure variation predicting fluid responsiveness in critically ill patients. Shock. 2008 ; 30 : 18S-22S.

- 15) Marik PE, Cavallazi R, Vasu T, et al : Dynamic changes in arterial waveform derived variables and fluid responsiveness in mechanical ventilated patients : a systemic review of the literature. *Crit Care Med.* 2009 ; 37 : 2642-7.
- 16) Cannesson M, Manach YL, Hofer CK, et al : Assessing the diagnostic accuracy of pulse pressure variations for the prediction of fluid responsiveness : a “gray zone” approach. *Anesthesiology.* 2011 ; 115 : 231-41.
- 17) Michard F, Lopes MR, Aulor JO Jr : Pulse pressure variation : beyond the fluid management of patients with shock. *Crit Care.* 2007 ; 11 : 131.
- 18) Freitas FG, Bafi AT, Nascente AP, et al : Predictive value of pulse pressure variation for fluid responsiveness in septic patients using lung-protective ventilation strategies. *Br J Anaesth.* 2013 ; 110 : 402-8.
- 19) Suehiro K, Rinka H, Ishikawa J, et al : Stroke volume variation as a predictor of fluid responsiveness in patients undergoing airway pressure release ventilation. *Anesth Intensive Care.* 2012 ; 40 : 767-72.
- 20) Daudel F, Tüller D, Krähenbühl S, et al : Pulse pressure and volume responsiveness during acutely increased pulmonary artery pressure : an experimental study. *Crit Care.* 2010 ; 14 : R122.
- 21) Wyler von Ballmoons M, Takala J, Roeck M, et al : Pulse-pressure variation and hemodynamic response in patients with elevated pulmonary artery pressure : a clinical study. *Critical Care.* 2010 ; 14 : R111.
- 22) Michard F, Richards G, Biais M, et al : Using pulse pressure variation or stroke volume variation to diagnose right ventricular failure? *Crit Care.* 2010 ; 14 : 451.