

特集

呼吸循環相互作用：腹圧変化の
静脈還流に与える影響

高田 正雄*

要 旨

呼吸時の腹圧の変化の下大静脈還流に与える影響を、abdominal vascular zone conditions という新しい概念を導入して解析した。簡単な下大静脈系のモデルに基づいて中心静脈圧が腹圧より高い時を zone III abdomen, 中心静脈圧が腹圧より低く下大静脈が虚脱して vascular waterfall が形成されている状態を zone II abdomen と定義した。腹圧の増加は下大静脈還流を zone III では増やし zone II では減らすことをモデルの数学的解析によって示し、下大静脈バイパスを用いた犬の実験で (N=12) 検証した。循環系の予備力が少なく複式呼吸が主体の小児心疾患患者では、呼吸時の腹圧変化の静脈還流に与える影響は無視できない。また呼吸以外の原因による腹圧の上昇（腹水、ショックパンツ使用時など）の静脈還流および心拍出量に与える影響の理解も周術期管理のポイントである。Abdominal zone の概念は上記のような病態の理解に生理学的にも臨床的にも有用であると思われた。

はじめに

集中治療医学の発達により人工呼吸をはじめとする積極的呼吸循環管理が日常的に行われるようになった最近では、呼吸が循環系の血行動態に及ぼす影響すなわち呼吸循環相互作用の理解は、単に生理学的な興味としてだけではなく臨床の患者管理の上で重要性を増して来ている。特に循環系

の予備力の少ない小児心疾患患者では、呼吸循環相互作用の理解は周術期の診断治療における重要なポイントである。近年“の呼吸”循環相互作用に関する研究“は呼吸”の心室拍出動態に及ぼす影響に主として焦点が絞られてきたが、呼吸の静脈還流に及ぼす影響については低圧系で虚脱しやすい静脈系の圧や血流の変化の測定が技術的に難しいこともあってその知見は未だ少ない。

自発呼吸の際の胸腔内圧の低下は、体静脈還流を増やす方向に作用することは良く知られている。それに対して呼吸時の横隔膜の下降運動による腹圧の上昇は、静脈還流を増加させるとも¹⁻⁵⁾減少させるとも⁶⁻⁸⁾全く逆の観察が文献的に報告されている。腹部血管床は大きなコンプライアンスを持つ生体で最大の容量血管床であり、僅かな経壁圧 (transmural pressure) の変化によりその血液量は大きく変化する。また腹部血管床の上流に位置する下肢血管床からの血液も、腹圧によって囲まれている腹部下大静脈を通して胸腔内に流れ込んでいる。したがって呼吸時の腹圧の変動は腹部血管床および下肢血管床からの静脈還流を変化させ体静脈還流に大きな影響を及ぼすと考えられるが、その生理学的メカニズムについては従来よく理解されていなかった。

我々は abdominal vascular zone conditions という新しい概念を導入して腹圧の変化の下大静脈還流に与える影響を解析した⁹⁾。本稿ではこの abdominal vascular zone conditions の概念を紹介するとともに、小児心疾患患者の周術期の病態の理解の上でこの概念がどのような臨床的意義があるかについて考察を加えてみたい。

*国立小児病院麻酔科

国立小児医療研究センター病態生理研究室

理論的解析

腹圧の変化の下大静脈還流に及ぼす影響を解析するため、我々は図1に示すような簡単な下大静脈系の集中定数モデルに基づいて abdominal vascular zone conditions という概念を定義した⁹⁾。このモデルは、下肢・腹壁の静脈などの腹部外血管床が上流に腹圧によって囲まれた腹部血管床が下流に位置する two serial compartment model であり、中心静脈圧 (Pivc) と腹圧 (Pab) の関係により横隔膜の直下で下大静脈が虚脱していわゆる vascular waterfall が形成される¹⁰⁾ という仮定を置いたのがポイントである。Pivc が Pab より高い場合を Zone III abdomen と定義した。この状態では下大静脈還流に対する下流圧は Pivc である。それに対して Pivc が Pab より低い時を Zone II abdomen と定義した。この状態では下大静脈が虚脱して vascular waterfall が形成されるため、下大静脈還流に対する実効的な下流圧は Pivc ではなく下大静脈を取り囲む腹圧 Pab となると考えた¹⁰⁾。故に abdominal vascular zone conditions は、下大静脈還流に対する横隔膜レベルでの実効の下流圧 (Pb) という概念を用いて以下のような簡単な式で表すことができる。

$$\text{If } Pivc \geq Pab, Pb = Pivc \quad (\text{Zone III abdomen})$$

$$\text{If } Pivc < Pab, Pb = Pab \quad (\text{Zone II abdomen})$$

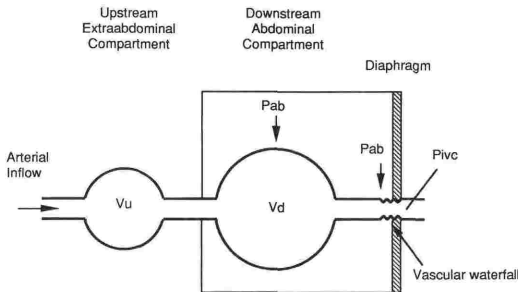


Fig. 1 A schematic illustration of the model of IVC circulation. Vd, blood volume in the downstream abdominal compartment; Vu, blood volume in the upstream extraabdominal compartment; Pivc, IVC pressure at the level of the diaphragm; Pab, abdominal pressure.

この定義は呼吸生理学領域でよく知られている West の肺の zone¹¹⁾ のアナロジーであり、Pivc は肺の zone の場合の左房圧に Pab は肺の zone の場合の肺胞圧に対応している。

このモデルにおいて、Pivc を一定に保ったまま Pab を ΔPab だけ増加させたときの各々の血管床の血液量と下大静脈還流の変化を考えてみよう (図2)。Zone III abdomen の場合、Pb は Pivc に等しい。Pab の上昇分 ΔPab は、腹部血管床を圧迫してその血液量を減少させるが、上流の腹部外血管床の血液量には影響しない。結果として下大静脈系より胸腔に血流が駆出され、下大静脈還流は一過性に増加する。Zone II abdomen の場合では、Pb は Pab に等しいため、Pab の上昇に伴い ΔPab だけ増加する。Pab の上昇分 ΔPab は、Zone III のときと同様に腹部血管床を圧迫するが、Pb も ΔPab だけ上昇するのでこの2つの効果は相殺され、腹部血管床の血液量は変化しない。対して上流の腹部外血管床では、Pb が ΔPab だけ上昇した分血液量が増加する。結果として下大静脈系に血液が鬱滞し、下大静脈還流は一過性に減少する。

以上の直感的な説明は、定量的に数式で表現することも可能である。下大静脈循環への動脈流入量と Pivc を一定と仮定し、腹部外、腹部内の血管床のコンプライアンスの値をそれぞれ Cu, Cd とすれば、Pab の上昇のち定常状態に達したときの下大静脈系の血液量の変化 $\Delta Vivc$ は、

$$\text{If } Pivc \geq Pab + \Delta Pab \quad (\text{Pure zone III abdomen})$$

$$\Delta Vivc = -\Delta Pab Cd$$

$$\text{If } Pivc \leq Pab \quad (\text{Pure zone II abdomen})$$

$$\Delta Vivc = \Delta Pab Cu$$

$$\text{If } Pab < Pivc < Pab + \Delta Pab \quad (\text{Transition from zone III to zone II})$$

$$\Delta Vivc = -(Pivc - Pab) Cd + (Pab + \Delta Pab - Pivc) Cu$$

と表すことができる⁹⁾。すなわち Zone III のときは $\Delta Vivc$ はマイナスで下大静脈還流は増加し、Zone II のときは $\Delta Vivc$ はプラスで下大静脈還流は減少する。また Pab の上昇によって腹部血管が Zone III から Zone II に移行する場合には、 $\Delta Vivc$ はマイナスないしプラスで、下大静脈還流

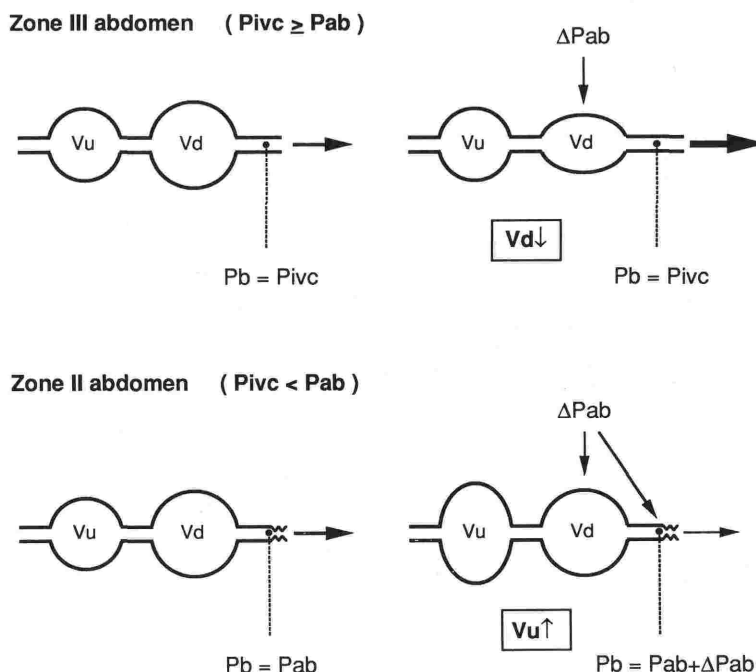


Fig. 2 Schematic illustrations showing changes in blood volumes in the IVC circulation with an increase in abdominal pressure with a zone III abdomen (panel A) and a zone II abdomen (panel B). Vd, blood volume in the downstream abdominal compartment; Vu, blood volume in the upstream extraabdominal compartment; Pivc, IVC pressure at the level of the diaphragm; Pab, abdominal pressure; ΔP_{ab} , step increase in abdominal pressure to achieve a new state; Pb, effective back pressure to IVC venous return at the level of the diaphragm.

は最初増加し後に減少する2峰性のパターンを呈するだろうと予測される。

実験方法および結果

この理論的予測が実際の生体で近似的に成り立つかどうかを検証するため、12匹の雑種成犬を開胸して下大静脈バイパスを施行した⁹⁾。図3に示したように、下大静脈を流れる静脈血を右房から挿入した下大静脈カニューラを通してリザーバーに脱血し、バイパスポンプによって上大静脈に戻した。この実験系では、バイパスポンプの流量を一定に保っておけば、リザーバーの血液量の変化は下大静脈還流量の変化を反映する。下大静脈カニューラとリザーバーの間に挿入した Starling resistor により中心静脈圧 Pivc を一定に保ち、腹壁上にのせたおもりによってベースラインの腹圧 Pab をコントロールしてさまざまな ab-

dominal zone の状態を作成した。そして横隔神経刺激により Pab を急激に上昇させ、リザーバーの血液量の変化を測定した。

典型的な実験データを図4に示す。Pivc を一定に保ちつつ、パネルAよりEにかけてベースラインの Pab が徐々に上げられている。パネルAのようにベースラインの Pab が Pivc より有意に低い状態 (Zone III abdomen) では、Pab の上昇によりリザーバーの血液量は増加し、下大静脈還流は増加した。対してパネルEのようにベースラインの Pab が Pivc より有意に高い状態 (Zone II abdomen) では、Pab の上昇によりリザーバーの血液量は減少し、下大静脈還流は減少した。この2つの間のパネルBからD、すなわち Pab 上昇に伴って腹部血管床が zone III より zone II に変わる場合には、リザーバーの血液量は増加して減少する2峰性の変化を示した。この実験結果は

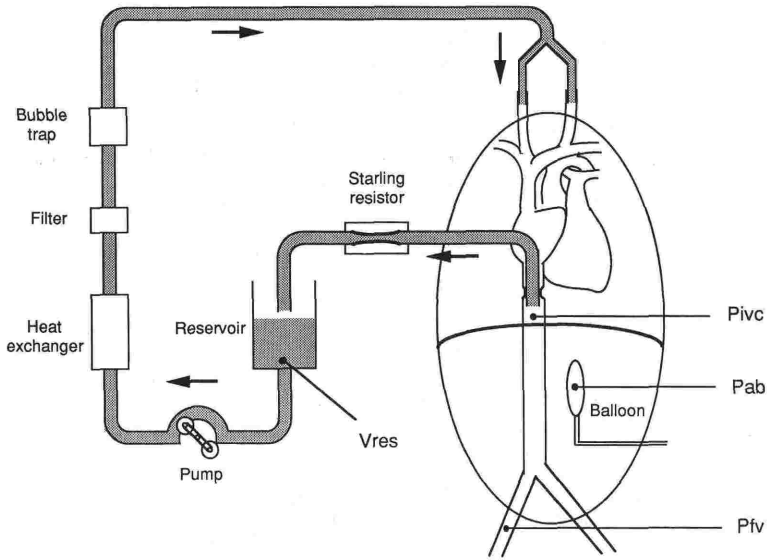


Fig. 3 A schematic illustration of the IVC bypass circuit. Pivc, IVC pressure at the level of the diaphragm; Pab, abdominal pressure; Pfv, femoral venous pressure; Vres, blood volume in the reservoir in the perfusion circuit.

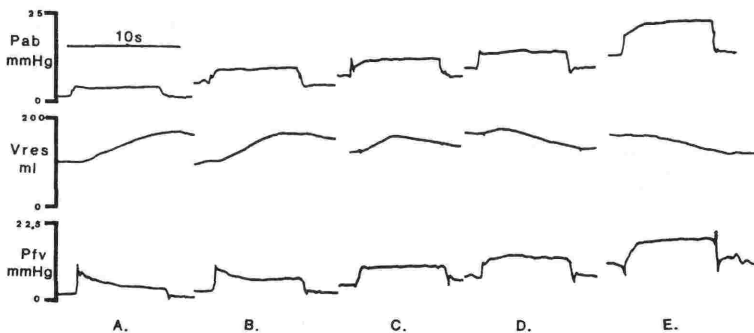


Fig. 4 Typical experimental data showing changes in abdominal pressure (Pab), reservoir blood volume (Vres), and femoral venous pressure (Pfv) during phrenic nerve stimulation.

前に述べた理論的予測とよく一致した。

モデルの有用性をさらに検証するため、上述の実験の computer simulation を行い実際のデータと比較することを試みた。このモデルにおいて、Pabの上昇の後に次の定常状態に到るまでの過渡状態は、2組の連立微分方程式と abdominal zone の状態を示す式で記述することができる⁹⁾。文献よりレジスタンスやコンプライアンスなどの血管系パラメーターの推定値を得、computer で4組の方程式を解くことによって、Pabの上昇に

伴うリザーバーの血液量の変化を計算した。図5に示す simulation の結果は、図4に見られた実際のリザーバーの血液量の変化の特徴、すなわち Zone III での単調増加、Zone II での単調減少、transitional zone での2相性の変化をよく再現することが可能であった。

考 察

Abdominal vacular zone conditions の概念を用いれば、腹圧の上昇が下大静脈還流をあるとき

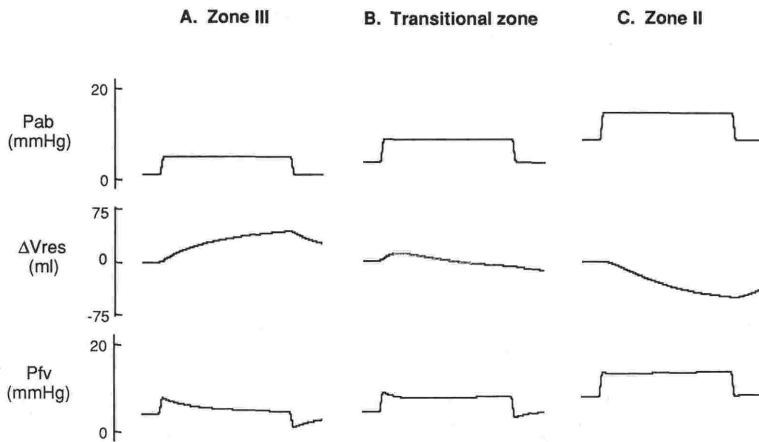


Fig. 5 A computer simulation of the experiments showing changes in abdominal pressure (Pab), reservoir blood volume (ΔV_{res}), and femoral venous pressure (Pfv). Panel A represents changes with a pure zone III abdomen, panel B represents changes with a transition from zone III to zone II abdomen, and panel C represents changes with a pure zone II abdomen.

は増加させるときは減少させることを簡単にかつ統一的に説明できる。呼吸時の腹圧上昇の下大静脈血流に及ぼす影響に関する過去の研究は、一見相互に矛盾するように見えるが、実は実験条件の違いにより abdominal zone の状態が異なっていたためと解釈することもできよう。例えば循環血液量が十分で中心静脈圧が高く腹圧が低い普通の生理的状态では、腹部は zone III の状態であると考えられるし、循環血液量が不足して中心静脈圧が低いときや腹水などによりベースラインの腹圧が高くなっている状態では、腹部は zone II の状態にある可能性が高い。

呼吸以外の他の原因による持続的な腹圧の上昇は心拍出量を増やすとも減らすとも報告されており¹²⁻¹⁵⁾ 文献的に一致を見ていない。Abdominal vascular zone conditions の概念は、持続的な腹圧の上昇がどのように定常状態での体静脈還流、すなわち心拍出量に影響を及ぼすかを考える際にも応用することができる。すなわち Zone III abdomen では、持続的な腹圧の上昇に対して腹部血管はいわば Capacitor として反応し、腹部血管床の実効的コンプライアンスは減少する。その結果 mean systemic pressure が上昇し静脈還流曲線が右上方にシフトして、一定の心機能のもとで

は体静脈還流を増やし心拍出量を増加させると予想される。また Zone II abdomen では、持続的な腹圧の上昇に対して腹部血管はいわば Starling resistor として反応し、下大静脈還流に対する実効的下流圧を増加させる。その結果見かけ上の resistance to venous return が増加し、体静脈還流を減らし心拍出量を減少させる方向に作用するのであろう。

Abdominal vascular zone の概念は、循環系の予備力の少ない小児心疾患患者の周術期病態の理解の上で臨床的にも重要であると思われる。小児では胸郭が柔軟で複式呼吸が主体であるため、自発呼吸の際の腹圧の変化は無視できない。心臓手術の術後に IPPV より weaning する際、中心静脈圧が上昇して抜管に失敗することが臨床にときに観察される¹⁶⁾。この現象は、自発呼吸への移行に伴う腹圧の上昇によって、水分貯溜傾向にある Zone III の腹部血管から大量の血液が駆出され、静脈還流が急激に増加して鬱血性心不全となったと解釈することができよう。また小児では腹部の絶対容量が小さいので、少量の水の貯溜や僅かな腹部圧迫によって腹圧は容易に上昇する。腹水貯溜時、腹膜還流施行時、Fontan 型手術の術後のショックパンツ使用時などに見られる持続的腹圧

上昇は、ある一定レベルを越えると Zone II abdomen をもたらし、心拍出量を減少させる可能性がある。同様に心肺蘇生の際にしばしば併用される腹部圧迫も、過度に到ると Zone II abdomen となり静脈還流を阻害して逆効果となる可能性があることに注意すべきである。

結 語

呼吸時の腹圧上昇の下大静脈還流に対する影響を、Abdominal vascular zone conditions という概念を用いて解析した。腹圧の増加は Zone III abdomen では下大静脈還流を増やし Zone II abdomen では下大静脈還流を減らすことを、理論的に予測し動物実験で検証した。Abdominal zone の概念は、腹圧上昇時の体静脈還流および心拍出量の変化を理解する上で、生理学的にも臨床的にも有用であると思われた。

文 献

- 1) Eckstein, R. W., Wiggers, C. J., Graham, G. R.: Phasic changes in inferior cava flow of intravascular origin. *Am. J. Physiol.* **148**:740-744, 1947.
- 2) Mixer, G.: Respiratory augmentation of inferior vena caval flow demonstrated by a low-resistance phasic flowmeter. *Am. J. Physiol.* **172**:446-456, 1953.
- 3) Brecher, G. A.: *Venous Return*. New York: Grune & Stratton, 1956.
- 4) Morgan, B. C., Abel, F. L., Mullins, G. L., et al.: Flow patterns in cavae, pulmonary artery, pulmonary vein, and aorta in intact dogs. *Am. J. Physiol.* **210**:903-909, 1966.
- 5) Moreno, A. H., Burchell, A. R., Van der Woude, R., et al.: Respiratory regulation of splanchnic and systemic venous return. *Am. J. Physiol.* **213**:455-465, 1967.
- 6) Wexler, L. D., Bergel, D. H., Gabe, I. T., et al.: Velocity of blood flow in normal human venae cavae. *Circ. Res.* **23**:349-359, 1968.
- 7) Lyoyd T. C., Jr: Effect of inspiration on inferior vena caval blood flow in dogs. *J. Appl. Physiol.* **55**:1701-1706, 1983.
- 8) Smith, H. J., Grøttum, P., Simonsen, S.: Ultrasonic assessment of abdominal venous return. I. Effect of cardiac action and respiration on mean velocity pattern, cross-sectional area and flow in the inferior vena cava and portal vein. *Acta Radiol. Diagn.* **26**:581-588, 1985.
- 9) Takata, M., Wise, R., Robotham, J. L.: Effects of abdominal pressure on venous return: abdominal vascular zone conditions. *J. Appl. Physiol.* **69**:1961-1972, 1990.
- 10) Permutt, S., Riley, R. L.: Hemodynamics of collapsible vessels with tone: the vascular waterfall. *J. Appl. Physiol.* **18**:924-932, 1963.
- 11) West, J., Dollery, C., Naimark, A.: Distribution of blood flow in isolated lung: relation to vascular and alveolar pressures. *J. Appl. Physiol.* **19**:713-724, 1964.
- 12) Ivankovich, A. D., Miletich, D. J., Albrecht, R. F., et al.: Cardiovascular effects of intraperitoneal insufflation with carbon dioxide and nitrous oxide in the dog. *Anesthesiology* **42**:281-287, 1975.
- 13) Richardson, J. D., Trinkle, J. K.: Hemodynamic and respiratory alterations with increased intra-abdominal pressure. *J. Surg. Res.* **20**:401-404, 1976.
- 14) Kashtan, J., Green, J. F., Parsons, E. Q., et al.: Hemodynamic effect of increased abdominal pressure. *J. Surg. Res.* **30**:249-255, 1981.
- 15) Masey S. A., Koehler, R. C., Rock, J. R., et al.: Effect of abdominal distension on central and regional hemodynamics in neonatal lambs. *Pediatr. Res.* **19**:1244-1249, 1985.
- 16) Lemaire, F., Teboul, J. L., Cinotti, L., et al.: Acute left ventricular dysfunction during unsuccessful weaning from mechanical ventilation. *Anesthesiology* **69**:171-179, 1988.