

## 呼吸と肺循環

丸山 一 男\*

呼吸は循環に影響を与えている<sup>1)</sup>。特に、循環血液量が減少している患者では、血圧の呼吸性変動が大きくなる<sup>2)</sup>。これは、左心拍出量が呼吸サイクルで変動するためである。左心拍出量は、静脈環流量や右心室拍出量により変化する。左心室と右心室の心拍出量は平均すれば等しいが、呼吸サイクルの各位相では、微妙に異なっている。本稿では、呼吸による、肺内圧(気道内圧)、胸腔内圧の成り立ちを概説し、胸腔内圧に影響される胸腔内の心・血管内圧の変化と意義について、transmural pressure の考え方を紹介する。さらに、右心系心臓手術後患者、心不全患者での人工呼吸の肺循環への影響についてまとめ、人工呼吸による、呼吸運動に対する酸素消費量軽減効果について述べる。

### 肺内圧と胸腔内圧

呼吸運動により、肺内圧 (intrapulmonary pressure)、胸腔内圧 (intrathoracic pressure) が変化する<sup>3)</sup>。肺内圧は、胸郭や肺組織の recoil force と肺容量で決定され、肺血流に影響する。胸腔内圧は、胸郭の recoil force と肺容量で決定され、静脈環流に影響している。臨床的に、肺内圧は気道内圧で表され、胸腔内圧は食道内圧で代用できる。

自発呼吸下呼吸終末(機能的残気量レベル)(図1A)で呼吸が停止しているときの肺各部の圧関係は図のようである。胸壁にかかる力は胸壁自身の外側へ広がろうとする力(胸壁の recoil force)と胸腔内圧により内側へ引かれる力で、両者は等しくつりあっている。肺表面にかかる力は胸腔内圧により外側に引ばられる力と肺組織が内側に縮もうとする力(肺組織の recoil force)

で、両者は等しくつりあっている。呼吸終末では換気が停止しているため、肺内外の圧差はなく、肺内圧は大気圧と等しい。

自発呼吸下深吸気終末(全肺気量レベル)(図1B)では、胸壁にかかる力として、内側への力は胸壁自身の内側へ戻ろうとする力(胸壁の recoil force)と胸腔内圧により内側へ引かれる力の和で、外側への力である呼吸筋の筋力とつりあっている。呼吸終末同様、吸気終末でも換気が停止しているため、肺内外の圧差はなく、肺内圧は大気圧と等しい。

陽圧人工呼吸の吸気終末(図1C)では、胸腔内圧は胸壁に対して外側への力となり、肺表面に対して内側への力となっている。胸壁自身は元に戻ろうとする力が内側に働き、胸壁にかかっている胸腔内圧とつりあっている。肺表面にかかる力は、胸腔内圧と肺組織自身の recoil force の和で、肺内圧とつりあっている。換気が停止している吸気終末では、肺内圧と気道内圧は等しい。

### 高気道内圧時の胸腔内圧

重症急性呼吸不全で人工呼吸中の患者では、高気道内圧を示すことが多い。しかしながら気道内圧が高いとき、必ず胸腔内圧も高いとは言えないので注意を要する。胸腔内圧の絶対値は、肺内圧と肺組織 recoil force の差に等しいが、肺内圧(=気道内圧)が高くても肺組織 recoil force が高ければ、両者の差である胸腔内圧は正常でありうる。肺組織 recoil force は、ARDS、肺線維症等の肺疾患、うっ血肺等、コンプライアンスが低下している肺組織で増強する。また、コンプライアンスが低い肺では、吸気終末肺容量が低下するので胸郭容量が低下するため、言い替えると胸郭の広がりが少ないため胸郭(胸壁)の recoil force

\*三重大学医学部麻酔学講座・集中治療部・救急部

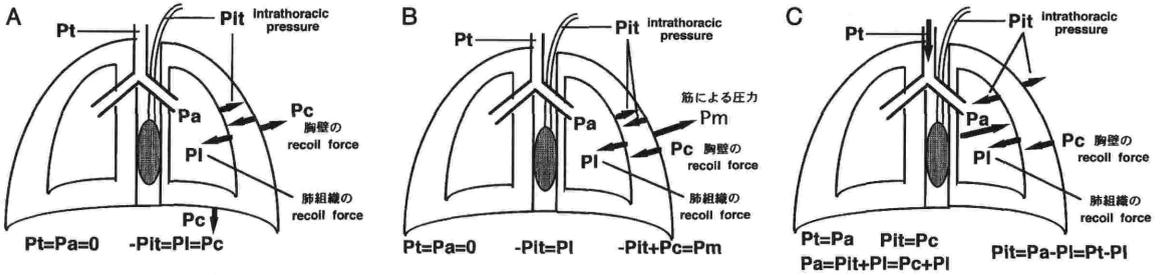


図1 胸腔内圧, 気道内圧, 肺内圧, 肺組織 recoil force, 胸壁 recoil force の関係

Versprille の図 (Acta Anaesthesiol Scand 34 : Suppl. 94 : 51-62, 1990) を改変して引用

**A 自発呼吸呼気終末**

Pit, 胸腔内圧 ; Pc, 胸壁 recoil force ; Pl, 肺組織 recoil force ; Pt, 気道内圧 ; Pa, 肺内圧

FRC レベルで呼吸が停止しているとき, 空気の移動が停止しているため, 大気圧を 0 とすると, 気道内圧と肺内圧は 0. 胸腔内圧は, 胸壁を内側に, 肺組織を外側に引き込む力となっている. 肺組織の表面にかかる力は, 内側方向に肺組織 recoil force, 外側方向に胸腔内圧となり, 両者は釣り合っている. 外側方向の胸壁 recoil force は胸腔内圧により内側に引き込まれる力とつりあっている.

**B 自発呼吸深吸気終末**

深吸気では, 胸壁を外側に広げる力 (Pm) が呼吸筋によりかかり, 胸郭 (胸壁) recoil force (Pc) の方向は呼気終末時とは逆で, 内側方向になる. 胸壁にかかる力は, 外側方向に筋肉による力, 内側方向に胸郭 (胸壁) recoil force と胸腔内圧の和で, 両者がつりあっている.

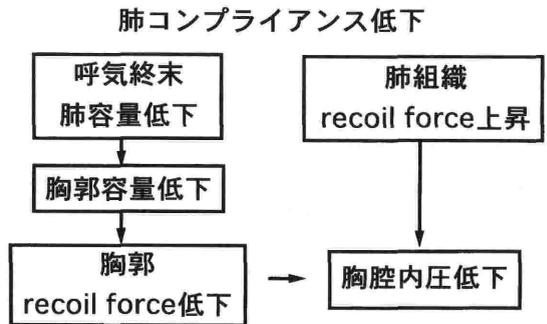
**C 陽圧呼吸吸気終末**

肺組織表面にかかる力は, 外側方向に肺を広げようとする気道内圧 (=肺内圧), 内側方向に肺組織 recoil force と胸腔内圧の和で, 両者がつりあっている. 胸腔内圧は, 肺内圧 (=気道内圧) と肺組織 recoil force の差と等しい.

が低下する (図 2). 胸郭 (胸壁) recoil force は胸腔内圧に等しい. したがって, 人工呼吸中の患者では気道内圧が高くても, 静脈環流低下の判断には慎重を要する. 胸腔内圧が静脈環流に影響を及ぼすのであり, 気道内圧上昇がある時, 胸腔内圧上昇が伴えば静脈環流は減少するといえる.

**中心静脈圧と胸腔内圧 : transmural pressure (図 3)**

Transmural pressure (壁内外圧差) とは, 隔壁の内外圧差であり, 血管や心腔の実効圧を示している. 一般に, 血管や心腔内にカテーテルを留置することにより測定できる血管/心腔内圧は大気圧を基準 (0 mmHg) としている. 正確に考えると, 血行動態に影響を及ぼす実効圧は血管内の圧力と血管外の圧力の差である. 例えば, 中心静脈圧の実効圧 (transmural central venous pressure) は, 中心静脈圧から胸腔内圧を差し引いた値となる. 陽圧呼吸吸気では, 中心静脈圧と胸腔内圧の両者が同時に上昇するが, 胸腔内圧上昇の程度が大きいので, transmural central venous pressure は低下する. これは右心室の実効充満圧低下を意味し, 右



● 気道内圧が高くても, 肺組織のrecoil force が強く, 肺容量が増加しない場合, 胸腔内圧上昇しない

図 2 低肺コンプライアンスと高気道内圧

心拍量減少の一因となる.

**陽圧換気サイクルの左右心拍量への影響**

陽圧換気吸気の右心拍量は, 呼気終末右心室拍量に比し低下する (図 4). 低下した右心室拍量は, 呼気の初期に増加する<sup>1)</sup>. 一回陽圧換気中の平均右心室拍量は, 呼気終末時の右心室拍量に比し10%低下している<sup>4)</sup>. 呼気終末では

transmural pressure = 内圧-外圧

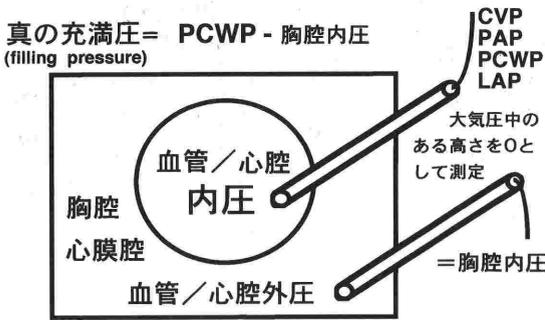


図3 Transmural pressure

臨床で測定している圧は、大気圧中のある高さとして測定した圧である。循環動態に影響するのは、心血管腔内の実効圧で、例えば、左室拡張期充滿圧(PCWP)の実効圧は、測定されたPCWPから胸腔内圧を差し引いた値である。

る。一方、左心室拍出量は吸気初期には維持されるが、その機序は肺胞内圧が上昇することにより肺血管が圧迫され、同時に、肺血管内の血液を左心房へしぼり (squeeze) 出し、右心室拍出量低下分を補う結果になるためである。このように、陽圧換気では左右の心拍出量が異なるため、肺に存在する血液量は、吸気で減少し、呼気で増加する。IPPV 吸気時における肺血液量の減少量は、循環血液量が正常、もしくは正常以下の場合に大きく、循環血液量が多い場合は少ない。IPPV の肺循環への影響は循環血液量によって異なると考えられる。

陽圧換気と右心系手術患者

陽圧換気は、右心系手術患者の心拍出量に影響が大きい。Fontan 手術や Fallot 四徴症の手術後では、肺血流の維持が重要で、間欠的陽圧呼吸 (IPPV) は、胸腔内圧を高め肺血流が減少するため、手術後の人工呼吸は、PEEP をかけずに、最大気道内圧を低く保つことが推奨されている。IPPV による気道内圧の上昇や肺血管の収縮が肺動脈逆流を増加することが報告されている。こうした患者では、自発呼吸により肺血流量と心拍出量が増加する。最近、Fallot 四徴症の根治手術後、胸郭周囲に装着した陰圧呼吸器で陰圧人工呼吸を行うと肺血管抵抗、体血管抵抗が減少し心拍出量が増加することが報告された<sup>5)</sup>。

陽圧換気サイクルと左右心拍出量

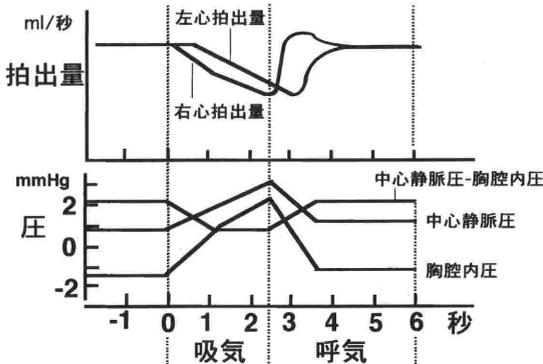


図4 陽圧換気サイクルの心拍出量への影響

Versprille の図 (Eur J Anaesthesiology 11: 15-23, 1994) を改変して引用

右心室と左心室の心拍出量は等しいが、換気サイクルの各時相で、右心室と左心室の心拍出量は異なる。吸気では右心室拍出量の低下に遅れて、左心室拍出量が減少する。肺内血液量は吸気で減少し、呼気で回復する。右心室拍出量は吸気終末で最も低下し、左心室拍出量は呼気の初期で最も低下する。呼気では右心室拍出量が増加し、次いで左心室拍出量が増加する。陽圧吸気時の右心室拍出量低下は、中心静脈圧が上昇することにより、静脈系の血管内圧が上昇し静脈系への血液貯留が発生するため静脈環流が減少するためと考えられ

間欠的陽圧呼吸の不全心への影響

心不全患者に対する IPPV は、肺静脈環流を促進し左心室拍出量を増加する作用を持つ<sup>6)</sup>。その機序として以下の3点が挙げられる。①陽圧による肺血管床の squeezing, ②胸腔内圧上昇や肺の心臓圧迫による transmural ventricular pressure 低下, ③静脈環流減少による右心室充滿低下が、右心室の左心室圧迫を軽減し、左心室コンプライアンスを上げる。また、人工呼吸により呼吸筋の酸素消費量を軽減できるため、全身酸素消費量・酸素需要を下げることができ、心仕事量を軽減できる。

PEEP の肺循環への影響

一般に、呼気終末陽圧 (PEEP) は、①胸腔内圧を上げ、静脈環流を下げ、②肺血管を圧迫し、

右心室後負荷を増加する。右心室機能低下例では、PEEP 15cm H<sub>2</sub>O 以上で、右室駆出率が低下し、右心室容積が増加し左心室を圧迫することにより左心室コンプライアンスが低下する。また、胸腔内圧上昇は、心臓を圧迫することになり、左心室コンプライアンスを低下させる。ただし、肺コンプライアンスが低い場合、PEEP を上げて、肺容量は増加しないため胸腔内圧も上昇しないので、PEEP の循環への影響は小さくなる。PEEP 使用時の循環動態の変化には、心エコーを施行し、右心室容積が低下していれば輸血・輸液負荷で対処し、右心室容積が増大していたり右心室収縮性が低下していれば強心薬で対処する<sup>7)</sup>。

気道内圧が高くなると胸腔内に位置する心血管の transmural pressure は低下する (図 4)。この現象は、心血管の内圧 (大気圧を 0 とした時の圧) の上昇に比し、胸腔内圧の上昇の方が大きいからである。内圧が変化するとその心血管の容量も変化する。一般に、コンプライアンスは、 $\Delta V / \Delta P$  で表されるが、血管内容量が増加するにつれ血管内圧は直線的に上昇し、ある容量を超えると内圧の増加は急峻となる。すなわち、循環血液量が多ければ、少しの容量増加でも内圧の上昇は大きい。これを逆に表現すると、①循環血液量が多いとき、内圧が低下したときの血管内容量の低下は少なく、②循環血液量が少ないとき、内圧が低下したときの血管内容量の低下は大きくなる。気道内圧が陽圧呼吸や PEEP で高くなったとき血管の実効内圧である transmural pressure は低下するので、血管容量は低下するが、循環血液量が少ないと血管容量の低下の程度が大きくなる。これは、循環血液量が少ない患者で、血圧の呼吸性変動が大きくなる現象に関与している。

#### 人工呼吸と全身酸素消費量 (図 5)

人工呼吸による全身酸素消費量軽減効果を、心臓手術後患者について検討した<sup>8)</sup>。体外循環 (CPB) 後 12 時間で自発呼吸に戻した群 (S 群, n = 7) と、36 時間後まで従量式調節呼吸を継続した群 (M 群, n = 7) の 2 群に患者を分け、全身酸素消費量を肺動脈カテーテルを用いて Fick の原理で算出した。全身酸素消費量は、CPB 後に増加した。S 群では CPB 終了 12, 24, 36 時間後の値に差はなかった。M 群では CPB 終了 36 時

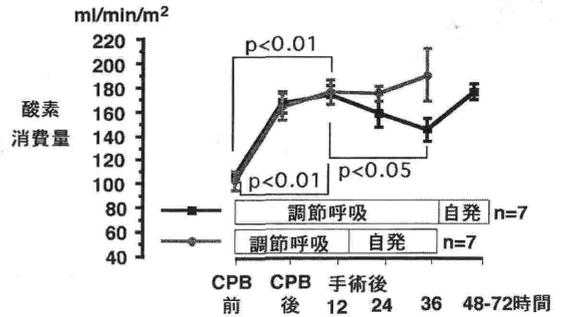


図 5 心臓手術後の人工呼吸による呼吸酸素消費量軽減効果  
麻酔と蘇生 31: 61-64, 1995より引用

間後の値は 12 時間後に比し、有意に低下したが、その後 (CPB 終了後 48-72 時間)、自発呼吸に戻すと再上昇した (図 5)。全身酸素供給量は、両群間に差はなかった。調節呼吸により、呼吸に使用される酸素消費量が軽減されたために、全身酸素消費量の低下がもたらされたと推察される。

#### 文 献

- 1) Versprille A : Basic mechanisms and clinical consequences of cyclic changes in pulmonary blood flow and blood volume during mechanical ventilation. *Eur J Anaesthesiol* 11 : 15-23, 1994
- 2) Perel A, Pizov R, Cotev S : Systolic blood pressure variation is a sensitive indicator of hypovolemia in ventilated dogs subjected to graded hemorrhage. *Anesthesiology* 67 : 498-502, 1987
- 3) Versprille A : The pulmonary circulation during mechanical ventilation. *Acta Anaesthesiol Scand* 34 : Suppl. 94 : 51-62, 1990
- 4) Versprille A, Jansen JRC, Frietman RC, et al : Negative effect of insufflation on cardiac output and pulmonary blood volume. *Acta Anaesthesiol Scand* 34 : 607-615, 1990
- 5) Shekerdemian LS, Shore DF, Lincoln C, et al : Negative pressure ventilation improves cardiac output after right heart surgery. *Circulation* 94 [suppl II] : II-49-II-55, 1996
- 6) Robotham JL, Cherry D, Mitzner W, et al : A re-evaluation of the hemodynamic consequences of intermittent positive pressure ventilation. *Crit Care Med* 11 : 783-793, 1983
- 7) 山田達也, 武田純三 : 終末呼気陽圧の循環系への影響 - 静脈環流, 右室機能, 左室機能について : 最近の知見から - . *Cardiovascular Anesthesia* 2 : 131-137, 1998
- 8) Maruyama K, Mizumoto T, Takeuchi M, et al : Changes in whole-body oxygen consumption during recovery from high-dose narcotic anesthesia in cardiac surgery: controlled mechanical ventilation vs. spontaneous respiration. *麻酔と蘇生* 31 : 61-64, 1995