

# 肺保護換気戦略の最新知識

## — 臨床的なアプローチ —

横浜市立大学附属市民総合医療センター集中治療部

刈谷 隆之 *KARIYA, Takayuki*      大塚 将秀 *OHTSUKA, Masahide*



### 概要

人工呼吸管理は人工呼吸器関連肺傷害の発症の最少化が目標となり、肺保護換気戦略と呼ばれている。従来の指標である気道内圧・一回換気量とその問題点、新たな指標である駆動圧・経肺圧、そして肺保護換気戦略の非肺傷害患者への適用について述べる。



### ↑ Key Word

VALI (人工呼吸器関連肺傷害) 肺保護換気戦略 駆動圧 経肺圧

## 1

### 人工呼吸器関連肺傷害

人工呼吸療法は、重症呼吸不全の患者に対し、酸素化の維持・換気量の維持・呼吸仕事量の軽減を目的として行われる。一方、呼吸不全治療として行われるものでありながら、人工呼吸を続けていると肺傷害が進行し、呼吸不全が悪化するケースがあることも知られていた。1970～1980年代には動物実験で不適切な換気設定により肺傷害を生じることが示され、ventilator-induced lung injury (VILI) と呼ばれた。臨床では人工呼吸管理以外にも種々の因子が影響するため、ventilator-associated lung injury (VALI, 人工呼吸器関連肺傷害) と呼ばれる。動物実験では非常に高い気道内圧で換気

を行ったモデルで肺傷害が生じていること、臨床では高い気道内圧で換気されているときに肺傷害の発症が多かったことから、高い気道内陽圧が肺傷害発症の原因と考えられ、圧外傷 (barotrauma) とも呼ばれた。

その後、胸郭の拡張を抑え、高い気道内圧であっても肺気量の増加を伴わないようにした動物実験モデルでは、肺傷害が生じないことが示され、肺胸腔への過大な容量負荷が VALI/VILI の原因であるとする、容量外傷 (volutrauma) の概念が提唱された<sup>1)</sup>。

ARDS: acute respiratory distress syndrome

CT: computed tomography

ICU: intensive care unit

PEEP: positive end-expiratory pressure

RCT: randomized controlled trial

VALI: ventilator-associated lung injury

VILI: ventilator-induced lung injury

barotrauma, volutrauma は、ともに VALI/VILI 発症の原因として吸気時の状態に着目した概念である。一方、呼気時の状態に着目し、高い PEEP と低い PEEP で換気を行った動物実験では、低 PEEP 群で肺傷害が生じることが示された。この機序として換気に伴って肺胞が拡張—虚脱を繰り返すことが原因と推定され、atelectrauma の概念が提唱された<sup>2)</sup>。

ma/volutrauma を防ぐために一回換気量を少なくし、プラトー圧を低く抑え、atelectrauma を防ぐために PEEP を高く設定することである。しかし、これらを織り込んだ人工呼吸器設定では、分時換気量の低下は避けられず、高二酸化炭素血症と呼吸性アシドーシスを招きやすい。換気・酸素化の最適化を重視していた当時は、日常臨床では 10~12 mL/kg 程度の大きな一回換気量が用いられるのが通例であった。

そのようななか、1995年に Amato らは、ARDS 患者の人工呼吸管理において、高い PEEP、6 mL/kg 未満の一回換気量、40 cmH<sub>2</sub>O 未満の最高気道内圧、高二酸化炭素血症の許容 (permissive hypercapnia) という新しいアプローチと、従来通りの管理 [12 mL/

2

肺保護換気戦略の始まり

barotrauma/volutrauma, atelectrauma の研究から導かれる肺傷害の予防は、barotrau-

肺保護換気戦略にかかわる気道内圧

①プラトー圧

従量式換気における吸気ポーズ相終末の気道内圧のこと。気流がないので、気道抵抗で生じる圧を含まない、肺胞を拡張させるのに必要な気道内圧で、吸気時の肺胞内圧と等しいとされる (図 1a)。従圧式換気では、設定された吸気圧が吸気時の肺胞内圧に相当する (図 1b)。ただし、吸気相終末に気流が 0 になっていない場合は、肺胞内圧が吸気圧に達していないので、吸気圧は肺胞内圧を反映しない。

②駆動圧

肺の拡張—収縮サイクルにおける、肺胞内圧の変化の大きさのこと。従量式換気では「プラトー圧-PEEP」、従圧式換気では「吸気圧-PEEP」で求める (図 1)。

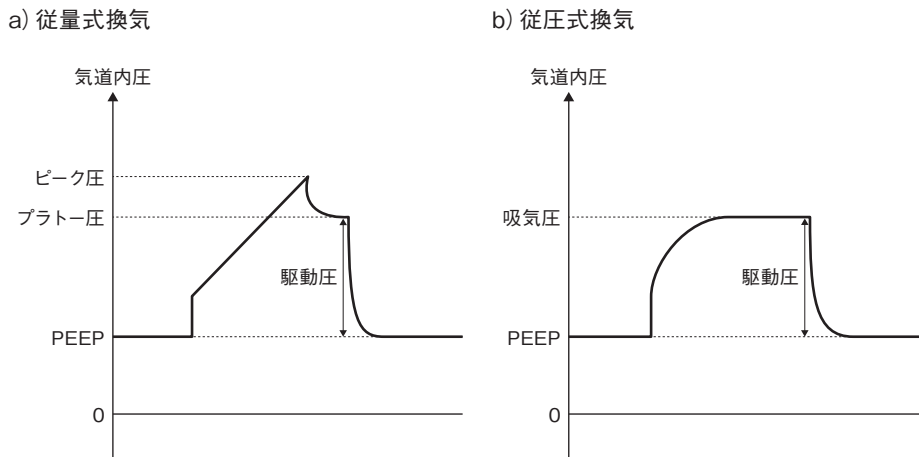


図 1 従量式および従圧式換気での気道内圧波形と各種の圧

表 1 ARMA study<sup>4)</sup>で使用された PEEP table

F <sub>I</sub> O <sub>2</sub>	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
PEEP [cmH <sub>2</sub> O]	5	5	8	8	10	10	10	12	14	14	14	16	18	18	20	22	24

表の F<sub>I</sub>O<sub>2</sub> と PEEP の組み合わせで人工呼吸器を設定し、酸素化の目標を PaO<sub>2</sub> で 55~80 Torr, SpO<sub>2</sub> で 88~95% とする。この目標を下回ったら 1 列右の F<sub>I</sub>O<sub>2</sub> と PEEP の組み合わせに、目標を超えたら 1 列左の組み合わせに変更する。例: F<sub>I</sub>O<sub>2</sub> 0.7, PEEP 10 cmH<sub>2</sub>O の設定で、PaO<sub>2</sub> が 50 Torr となったら F<sub>I</sub>O<sub>2</sub> 0.7, PEEP 12 cmH<sub>2</sub>O に設定を変更する。

kg の一回換気量, 吸入気酸素分画 (F<sub>I</sub>O<sub>2</sub>) と血行動態をガイドにした最低限の PEEP, 正常な PaCO<sub>2</sub> の維持] を比較する。28 例の小規模な無作為化比較試験 (RCT) を行い、前者で VALI が減少することを報告した<sup>3)</sup>。

この新しいアプローチは、さらに大規模な多施設無作為化比較試験で検証された。2000 年に発表された、通称 ARMA study と呼ばれる研究では、一回換気量を 6 mL/kg (予測体重) に低く抑えた群を 12 mL/kg の対照群と比較し、死亡率の有意な低下を報告した<sup>4)</sup>。この研究により、VALI とその発症予防を考慮した換気設定の重要性が広く認識されるようになり、人工呼吸管理の目標が、「ガス交換の最適化」から「ガス交換を生命維持に必要な最低限に抑えて VALI の発症を最少化する」ことに変化した。

### 3

#### 肺保護換気戦略の基本

VALI と肺保護換気戦略の研究は、ARDS の研究とともに進んできている。これは、ARDS 患者の肺では、正常な換気が行われる肺領域が体格から予測されるよりも非常に小さいため、肺過伸展が発生しやすいこと、傷害肺では肺重量が増加して下側肺が虚脱しやすいことから VALI を発症しやすく、ARDS 患者の人工呼吸管理において大きなテーマとなるためである。

### 3-1 barotrauma/volutrauma と換気量/プラトー圧制限

ARDS などの傷害肺では、正常な含気を保った肺胞が減少し、5~6 歳の小児相当の体積とも報告されている (baby lung concept)<sup>5)</sup>。このため、一回換気量が制限されなければ、この「小さな肺」に過剰な容量・圧がかかることになり、barotrauma/volutrauma を生じてしまう。また、正常な含気を保っている領域の大きさは肺傷害の重症度によって異なるため、適正な一回換気量を推定することは困難である。ARMA study 以降、6 mL/kg が 1 つの目安とされることも多いが、実際には 6 mL/kg でも過剰となる症例が存在する。このため、気道内圧の制限 (プラトー圧制限) も併用する必要がある。

### 3-2 atelectrauma と PEEP 付加

肺保護換気戦略における PEEP の役割は、呼気終末時に肺胞が虚脱することを防ぎ、肺胞が周期的に虚脱・再拡張を繰り返すことによる肺傷害 (atelectrauma) を予防することである。しかし、PEEP の設定方法について確立された方法はない。肺保護換気戦略が注目される端緒となった ARMA study<sup>4)</sup> では、酸素化の目標として PaO<sub>2</sub> であれば 55~80 Torr, SpO<sub>2</sub> であれば 88~95% とし、ここから逸脱した場合は、PEEP table と呼ばれる表 (表 1) に基づいて、F<sub>I</sub>O<sub>2</sub> と PEEP を組み合わせで変更する方法が採用されている。表 1 に示された PEEP は、

当時の一般的な設定に比べて高いものであった。その値に確固たる根拠があるわけではないが、その後も標準的な値として用いられている。この PEEP を対照群とし、より高い PEEP 設定を被験群としたその後の3つの大規模臨床研究では、いずれも死亡率に有意差がなかった。その後、この3つの研究のメタ解析が行われたが、やはり死亡率に有意差は示されなかった。ただし、 $\text{PaO}_2/\text{F}_1\text{O}_2 \leq 200$  の中等～重症の ARDS 患者においては、死亡率の低下傾向を示した<sup>6)</sup>。本邦の「ARDS 診療ガイドライン 2016」<sup>7)</sup>では、「中等度以上の ARDS には高めの PEEP を用いることを提案する」とされている。

## 4

### 新しい知見

#### 4-1 駆動圧 (driving pressure)

肺保護換気戦略の新たな指標に、プラトー圧と PEEP の差である 駆動圧 (driving pressure) がある。

ARDS に対する人工呼吸療法の研究から、「少ない一回換気量」「低いプラトー圧」「高い PEEP 設定」は、肺保護換気戦略の標準的な管理方針となった。しかし、実際の医療現場ではこのすべてを満たすことがしばしば困難となる。たとえば、PEEP を上げることでプラトー圧制限を守れなくなる状況である。

2015 年に Amato らは、過去に行われた 9 つの RCT の 3562 例のデータを対象として、上記 3 つの指標に駆動圧を加えた 4 つの因子のいずれが RCT の結果に最も影響を与えたか、統計学的な解析を行った<sup>8)</sup>。その結果、PEEP が一定の場合は、プラトー圧が高くなるほど (= 駆動圧が大きくなるほど) 死亡率は上昇し、プラトー圧が上昇しても PEEP も上昇してい

る場合 (= 駆動圧が一定) は死亡率が上昇せず、プラトー圧が一定でも PEEP が上昇している場合 (= 駆動圧が低下する) は死亡率が低下することが示された。

この結果を前述の状態に当てはめると、PEEP を上げた際にプラトー圧が上昇しても駆動圧が不変なので、死亡率は上昇しないことになる。

#### 【ARDS 患者と駆動圧 (driving pressure) の関係】

駆動圧 ( $\Delta P$ ) とは、「気流が 0 となる吸気終末と呼気終末の気道内圧の差」のことで、肺および胸郭を拡張させるために必要な圧力のことである (図 1)。

$$\Delta P = \text{プラトー圧} - \text{PEEP}$$

で求められる。

ARDS 患者に対して、俗に「肺が硬い」という言い方がなされることがある。これは、ARDS 患者を用手換気した際に、換気量を得るために高い圧力 ( $\Delta P$ ) が必要なことから生まれた表現と思われるが、ARDS 患者の肺の状態を適切に表すものではない。気道抵抗に打ち勝って気流を流すために必要な圧を除いた患者の肺・胸郭を拡張する際に必要な圧力 ( $\Delta P$ ) は、呼吸器系コンプライアンス ( $C_{RS}$ ) によって決まり、

$$\Delta P = \frac{\text{一回換気量 (V}_T\text{)}}{C_{RS}}$$

という関係にある。

コンプライアンスは膨らみやすさの指標であり、値が大きいほど膨らみやすいことになる。 $C_{RS}$  は、肺コンプライアンス ( $C_L$ ) と胸壁コンプライアンス ( $C_{CW}$ ) に分けられ、

$$\frac{1}{C_{RS}} = \frac{1}{C_L} + \frac{1}{C_{CW}}$$

という関係にある。

ARDS 患者では、背側優位に肺胞虚脱が生じており、虚脱した肺胞の大部分は換気に関与しないため、換気に関与する正常な肺胞領域は大きく減少している (図 2)。しかし正常な肺胞

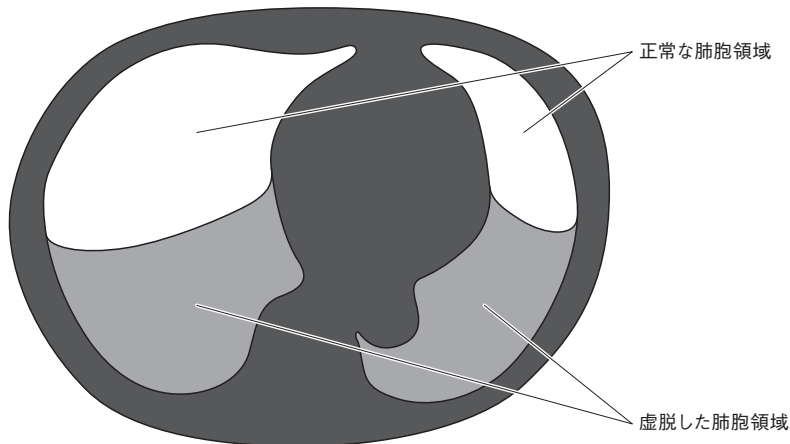


図2 ARDS患者の胸部CTの模式図  
肺全体としてのコンプライアンス ( $C_L$ ) は、正常な肺胞領域の大きさを反映する。

領域に限れば、コンプライアンスは保たれており、「硬くない」のである。

ARDS患者では、肺全体としてのコンプライアンス ( $C_L$ ) は、換気にかかわる正常な肺胞領域の大きさを反映している。 $C_{CW}$  は短時間では変化しないので、 $C_L$  の低下は  $C_{RS}$  の低下となり、 $C_{RS}$  は正常な肺胞領域の大きさの指標となる。そして、 $\Delta P$  を指標として一回換気量を決定することで、体格ではなく、正常肺領域の大きさ (ARDS の重症度) に合わせて一回換気量を設定することができる。

ここで注意すべき点は、駆動圧に関するデータは自発呼吸がない患者から得られたものであるということである。吸気努力がある患者の場合、肺を広げようとする力は、人工呼吸器による陽圧と呼吸筋の収縮による陰圧の胸腔内圧の合算になるので、駆動圧のみでの評価は、 $C_{RS}$  (正常肺胞の大きさ) を過大評価してしまうことになる。吸気努力が強い患者では、プラトー圧を下げても吸気努力が増して一回換気量が低下しないこともよく経験する。この状態は、決して「肺保護的ではない」ことに注意が必要である。

#### 4-2 経肺圧

VALI・肺保護換気戦略に関するエビデンスの多くは、自発呼吸がない条件下での研究の蓄積である。また、人工呼吸療法で治療者がモニタリングして設定を調整できるのは気道内圧やガス流量なので、プラトー圧や PEEP、駆動圧、一回換気量といった指標が検討されてきた。

現在では、酸素化能の維持や背側無気肺の減少、呼吸筋の廃用性萎縮予防などを考慮して、自発呼吸を温存した部分換気補助による人工呼吸管理を行うことが多くなってきている。

肺を拡張させる圧は、臓側胸膜を挟んだ肺胞内圧と胸腔内圧の差、すなわち経肺圧である (図3)。

経肺圧 = 肺胞内圧 - 胸腔内圧

肺過伸展を避ける肺保護換気戦略を行うに当たり、自発呼吸のない状態ではプラトー圧や駆動圧といった気道内圧を指標にした管理は有用である。これは、自発吸気がなければ胸腔内に強い陰圧が生じることはなく、気道内圧の制限は、経肺圧の制限になるからである (図3a → b, d)。

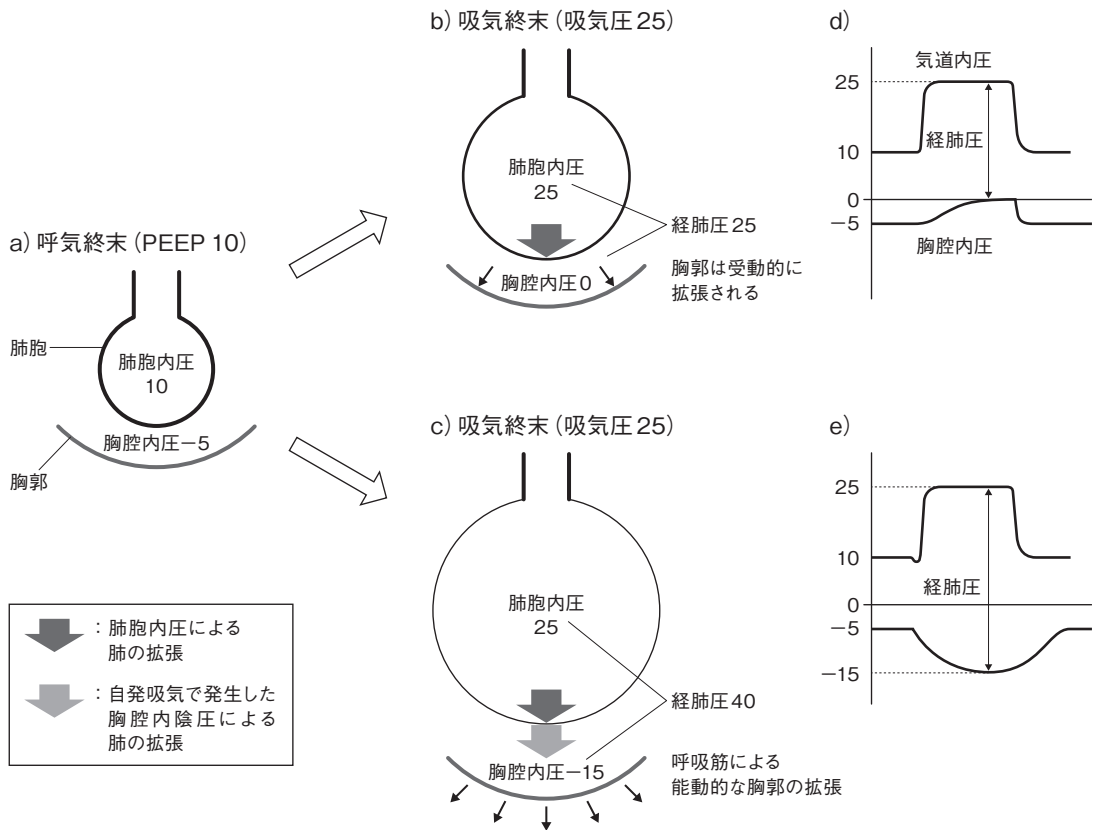


図3 自発呼吸の有無と経肺圧の関係

a) ~ c) : 肺胞・胸腔の模式図 (b は自発呼吸なし, c は自発呼吸あり)  
 d), e) : 気道内圧・胸腔内圧・経肺圧の関係と推移の模式図 (d は自発呼吸なし, e は自発呼吸あり)

対して、自発呼吸を温存した人工呼吸管理では、胸腔内圧は呼吸筋の収縮により低下し、吸気努力が強いと大きく陰圧になる。呼吸不全患者の人工呼吸管理で、患者の吸気努力が強く、陥没呼吸となり、設定の調整を要することはよく経験される。このような状況では、経肺圧は人工呼吸器でモニタされる気道内圧よりも大きくなり、プラトー圧や駆動圧の制限だけでは肺の過膨張を防ぐことができない(図3a→c, e)。

肺保護のためには、経肺圧をモニタして適切なレベルに管理することが理論的には望ましい。胸腔内圧を直接測定するのは侵襲的なので、代用として食道内圧を測定し、気道内圧との差を経肺圧としてモニタすることが試みられ

ている。重症のARDS患者で筋弛緩薬を48時間投与して、自発呼吸を抑制した群を対照群と比較し、死亡率を低下させることが報告されている<sup>9)</sup>。一方、完全な調節換気では呼吸筋の廃用性萎縮が数日間で発生することも報告されている。食道内圧測定による経肺圧の測定は、筋弛緩薬の使用が有益になる患者を判断するのに有用かもしれない。

食道内圧からの経肺圧の推定は、PEEPの設定に用いることもできる。ARMA study<sup>4)</sup>よりも高いPEEPの有用性を検証しようとした大規模臨床研究3つでは、いずれも予後の差が認められなかったことは前述した。肺胞のサイズは経肺圧によって決まる。肺は腹側から背側

#### 4-3 肺傷害患者以外での肺保護換気戦略

になるにしたがって肺自体の重さがより大きく加わる。傷害肺では炎症などにより肺の重量が増加しているため、この勾配はより大きくなる。また心臓などの縦隔の重さ、腹部臓器の重さも背側に大きくかかる。よって、背側ほど胸腔内圧は高くなって呼気終末に経肺圧が小さくなり、肺胞は虚脱しやすくなる。食道内圧測定から経肺圧を推定し、呼気終末でも 0 cmH<sub>2</sub>O 以上となるように PEEP を設定した群を通常の PEEP 設定を行った群と比較した研究<sup>10)</sup>では、酸素化能・肺コンプライアンスの改善・死亡率の低下が認められている。

ただし、食道内圧にはいくつかの問題がある。それは、食道内圧で代用している胸腔内圧は重力の影響により上部ほど低くなるため、経肺圧は肺の部位によって異なり、食道内圧は胸腔内圧全体を表しているわけではないことである。また、食道内圧・経肺圧のモニタリングができる人工呼吸器は限られており、広く普及しているものではない。したがって、経肺圧を直接患者管理に利用するのではなく、そのコンセプトを理解して臨床的な兆候(呼吸補助筋の使用、胸腔ドレーンが挿入されている患者では水封部の液面の動きなど)から強い吸気努力を示している患者を察知し、経肺圧の上昇を疑って対処することが重要である。

前述のように、肺保護換気戦略は ARDS 患者を対象とした研究で進歩してきたが、近年は正常肺患者への適用も研究されている。

15 編の RCT の、全身麻酔手術を受けた 2127 例のデータをメタ解析した研究では、一回換気量を制限すると、大きな一回換気量かつ低 PEEP の群に比べて術後肺合併症の減少が認められた<sup>11)</sup>。また、小さな一回換気量であれば PEEP 値と肺合併症の発生率に関連はなかった。これは、一回換気量制限の健常肺に対する肺保護効果を示すものである。

ICU に入室した非 ARDS 患者 2184 例を対象として一回換気量の影響を分析したメタ解析では、一回換気量を 7 mL/kg 以下、7~10 mL/kg、10 mL/kg 以上の 3 群に分けると、ARDS または肺炎の発症率は、それぞれ 23%、28%、31%であったことが報告されている<sup>12)</sup>。また、17 編の RCT の、全身麻酔手術を受けた 2250 例のデータをメタ解析した研究では、駆動圧のみが術後肺合併症の発生に寄与していた<sup>13)</sup>。

これらから、全身麻酔下手術や非 ARDS の ICU 患者においても、ARDS 患者と同様な肺保護的人工呼吸管理が有用であることが示唆される。

■著者連絡先メールアドレス

刈谷隆之: tkariya@yokohama-cu.ac.jp

#### ■文献

- 1) Dreyfuss D, Soler P, Basset G, et al : High inflation pressure pulmonary edema. Respective effects of high airway pressure, high tidal volume, and positive end-expiratory pressure. *Am Rev Respir Dis* 137(5): 1159-1164, 1988
- 2) Muscedere JG, Mullen JB, Gan K, et al : Tidal ventilation at low airway pressures can augment lung injury. *Am J Respir Crit Care Med* 149(5): 1327-1334, 1994
- 3) Amato MB, Barbas CS, Medeiros DM, et al : Beneficial effects of the "open lung approach" with low distending pressures in acute respiratory distress syndrome. A prospective randomized study on mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 152(6 Pt 1): 1835-1846, 1995
- 4) Acute Respiratory Distress Syndrome Network, Brower RG, Matthay MA, et al : Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 342(18): 1301-1308, 2000

- 5) Gattinoni L, Pesenti A : The concept of "baby lung", Intensive Care Med 31(6): 776-784, 2005
- 6) Briel M, Meade M, Mercat A, et al : Higher vs lower positive end-expiratory pressure in patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome: systematic review and meta-analysis, JAMA 303(9): 865-873, 2010
- 7) 一般社団法人日本集中治療医学会, 一般社団法人日本呼吸療法医学会, 一般社団法人日本呼吸器学会 : ARDS 診療ガイドライン 2016  
<https://www.jsicm.org/pdf/ARDSGL2016.pdf> (2019年6月7日現在)
- 8) Amato MB, Meade MO, Slutsky AS, et al : Driving pressure and survival in the acute respiratory distress syndrome, N Engl J Med 372(8): 747-755, 2015
- 9) Papazian L, Forel JM, Gacouin A, et al : Neuromuscular blockers in early acute respiratory distress syndrome, N Engl J Med 363(12): 1107-1116, 2010
- 10) Talmor D, Sarge T, Malhotra A, et al : Mechanical ventilation guided by esophageal pressure in acute lung injury, N Engl J Med 359(20): 2095-2104, 2008
- 11) Serpa Neto A, Hemmes SN, Barbas CS, et al : Protective versus Conventional Ventilation for Surgery: A Systematic Review and Individual Patient Data Meta-analysis, Anesthesiology 123(1): 66-78, 2015
- 12) Neto AS, Simonis FD, Barbas CS, et al : Lung-Protective Ventilation With Low Tidal Volumes and the Occurrence of Pulmonary Complications in Patients Without Acute Respiratory Distress Syndrome: A Systematic Review and Individual Patient Data Analysis, Crit Care Med 43(10): 2155-2163, 2015
- 13) Neto AS, Hemmes SN, Barbas CS, et al : Association between driving pressure and development of postoperative pulmonary complications in patients undergoing mechanical ventilation for general anaesthesia: a meta-analysis of individual patient data, Lancet Respir Med 4(4): 272-280, 2016

# Clinical Engineering

●月刊誌・毎月25日発行 ●B5判  
 ●定価：本体 1,900円(税別)

2019年1月号 (Vol.30 No.1) ・好評発売中

**【特集】理解を深めよう！**

## ICU でよくみるおもな疾患・病態

【編集責任】磨田 裕 (横須賀共済病院集中治療科)

- 中枢神経系障害 (意識障害) …… 馬渡貴之ほか
- ショック …… 政所祐太郎ほか
- 急性冠症候群 (ACS) …… 山科 章
- 急性呼吸窮迫症候群 (ARDS) …… 倉橋清泰
- 急性腎障害 …… 山下徹志ほか
- 敗血症 (sepsis) …… 島居 傑ほか
- 血小板減少症 …… 江口 豊
- ICU における血糖コントロール …… 江木盛時
- 心臓外科術後症例 …… 八塩章弘ほか

**【特集関連記事】**

- 代謝性アシドーシス …… 大塚将秀
- せん妄 …… 鶴田良介

**【創刊 30 周年記念コーナー】**

臨床工学技士 & 月刊「Clinical Engineering」  
 30 年のあゆみ

**【連載】**

<新連載>第 2 種 ME 技術実力検定試験全問解説  
 第 1 回 午前の部 問題 1～30 …… 試験問題研究会  
 臨床工学技士に薦める今月の一冊 …… 許 俊鋭

学研メディカル秀潤社

〒141-8414 東京都品川区西五反田2-11-8 TEL: 03-6431-1234(営業部) FAX: 03-6431-1790  
 URL: <https://gakken-mesh.jp/>



# 腹臥位療法

昭和大学大学院保健医療学研究科呼吸ケア領域

宮川 哲夫 *MIYAGAWA, Tetsuo*

杏林大学保健学部理学療法学科

一場 友実 *ICHIBA, Tomomi*



## 概要

重症 ARDS ( $\text{PaO}_2/\text{F}_i\text{O}_2 < 150 \text{ mm Hg}$ ) に対する腹臥位療法は、酸素化能と生存率が改善する。最良の効果は、肺保護戦略と併用し、発症 48 時間以内に導入する 16 時間以上の腹臥位で得られ、高 PEEP、肺リクルートメント、血管拡張薬の吸入、ECMO の併用により、さらに相乗効果を認め、VALI を減少させ、生存率の有意な改善を認める。



## Key Word

ARDS 腹臥位 酸素化 生存率

## 1

### はじめに

腹臥位療法は、ARDS における重度の低酸素血症を治療するために 1970 年代以来使用されており、40 年以上に及ぶ臨床試験で、ARDS 患者の約 70% で酸素化の改善が報告されている。その後、酸素化改善のメカニズムにおいて、ガス交換能や肺メカニクスの観点から、CT スキャンを用いた荷重側肺のスポンジモデルによる解明が行われてきた<sup>1)</sup>。そして、PEEP 併用によるリクルートメント効果と低一回換気量による肺保護戦略の併用効果もいわれるようになってきた。さらに、20 年前から 10 の大規模臨床試験が行われ、それらのメタ分析

も報告されている。現在、腹臥位療法は、重症 ARDS の呼吸戦略の 1 つにあげられている。

**ARDS**: acute respiratory distress syndrome  
**CPP**: cerebral perfusion pressure  
**CPR**: cardio pulmonary resuscitation  
**CT**: computed tomography  
**ECMO**: extracorporeal membrane oxygenation  
**FRC**: functional residual capacity  
**ICP**: intracranial pressure  
**ICU**: intensive care unit  
**IL**: interleukin  
**NO**: nitric oxide  
**PEEP**: positive end-expiratory pressure  
**SAPS**: simplified acute physiology score  
**VALI**: ventilator-associated lung injury  
**VAP**: ventilator-associated pneumonia  
**VT**: tidal volume

表 1 おもな腹臥位に関する大規模臨床試験 [Gattinoni ほか<sup>1)</sup>より一部改変転載]

年	2001	2004	2006	2009	2013
	Gattinoni, et al <sup>2)</sup>	Guérin, et al <sup>3)</sup>	Mancebo, et al <sup>4)</sup>	Taccone, et al <sup>7)</sup>	Guérin, et al <sup>14)</sup>
研究期間	1996~1999	1998~2002	1998~2002	2004~2008	2008~2011
患者数	304	802	142	344	466
入院時平均 PaO <sub>2</sub> /F <sub>i</sub> O <sub>2</sub>	127	152	105	113	100
入院時 PEEP	10	8	7	10	10
SAPS IIスコア	40	46	41	41	46
腹臥位の時間	7 hr×5 days	9 hr×4 days	17 hr×10 days	18 hr×8 days	17 hr×4 days
肺保護戦略	no	no	VT<10 mL/kg	VT<10 mL/kg	6 mL/kg
フォローアップ	6 months	90 days	hospital discharge	6 months	90 days
死亡率 [%]					
背臥位	58.3	42.2	60	52.9	41
腹臥位	62.2	43.3	50	47.6	23.6
P 値	0.5	0.74	0.22	0.33	0.001

2

大規模臨床試験とメタ分析

先の大規模臨床研究では 10 のランダム化比較試験が行われ, Gattinoni (2001)<sup>2)</sup>, Guérin (2004)<sup>3)</sup>, Mancebo (2006)<sup>4)</sup>, Abroug (2008)<sup>5)</sup>, Alsaghir (2008)<sup>6)</sup>, Taccone (2009)<sup>7)</sup>, Sud (2010)<sup>8)</sup>, Lee (2014)<sup>9)</sup>, Hu (2014)<sup>10)</sup>, Beitler (2014)<sup>11)</sup>らの報告では, ARDS の腹臥位は酸素化を改善させるが, 生存率の改善は認めなかった (表 1)<sup>1), 12), 13)</sup>. 10 論文・1867 例を対象としたメタ分析でも, 酸素化は有意に改善するものの, 死亡率の改善は認めなかったが, PaO<sub>2</sub>/F<sub>i</sub>O<sub>2</sub><100 mmHg の重症 ARDS においては, 生存率の改善を認めている<sup>8)</sup>. さらに腹臥位の合併症として, 人工呼吸器関連肺炎 (VAP) の増加, 顔面の褥瘡, 挿管チューブの閉塞, 胸腔ドレーンの位置異常, 気胸, 血行動態の変動, 心停止などが報告されている<sup>1), 8), 12), 13)</sup>. その後, Guérin (2013) の大規模臨床研究 (PROSEVA 研究) では, PaO<sub>2</sub>/F<sub>i</sub>O<sub>2</sub><150

mmHg の重症 ARDS を対象に, PEEP 10 cmH<sub>2</sub>O, 低一回換気量 (6 mL/kg 以下, あるいはプラトー圧 30 cmH<sub>2</sub>O 以下), 発症 24 時間位以内の早期に腹臥位を 17 時間以上行い, 28 日および 90 日死亡率を有意に改善させている (表 1)<sup>1), 14)</sup>. 注目すべきは, 重症 ARDS において, 肺保護戦略, 高 PEEP の併用は, 先の 4 つの大規模研究のメタ分析の腹臥位よりも PROSEVA 研究では背臥位の生存率が高く, さらに, 早期の長時間の腹臥位を併用することにより, さらに生存率が改善していることである<sup>15)</sup>.

7 論文・2119 例 ARDS (1088 例腹臥位, 1031 背臥位) のメタ分析<sup>11)</sup>では, 腹臥位は 60 日死亡リスクを改善させないが, 低一回換気量 (8 mL/kg 以下) で腹臥位を併用すると死亡リスクが改善し, 一回換気量が 1 mL/kg 低下すると死亡リスクが 16.7%改善する. また, 12 時間/日以上 of 腹臥位でも, 死亡リスクが有意に改善している<sup>11)</sup>.

新しい 8 論文・2129 例を対象としたメタ分析でも, 死亡率の有意な改善を認めなかつ

た<sup>16)</sup>。そして、肺保護戦略の併用でも死亡率の改善は認めなかった。しかし、そのサブグループ解析において、5論文・1002例のメタ分析では12時間以上の腹臥位で死亡率が改善し、5論文・1006例のメタ分析では、中等症から重症( $\text{PaO}_2/\text{F}_1\text{O}_2 < 200 \text{ mmHg}$ )のARDSで死亡率が改善している。また、4日目の $\text{PaO}_2/\text{F}_1\text{O}_2$ は腹臥位で有意に高いが、挿管チューブの閉塞や顔面の褥瘡が多く認められた<sup>16)</sup>。

Guérin (2018)のAPRONET研究において、20カ国・141 ICUの6723例のうち735例のARDSを対象とした大規模研究<sup>17)</sup>では、101例のARDS(13.7%)に、少なくとも1セッションの腹臥位を施行していた。軽症5.9%(11/187例)、中等症10.3%(41/399例)、重症32.9%(49/149例)で、最初の腹臥位の時間は18(16~23)時間で、背臥位の $\text{PaO}_2/\text{F}_1\text{O}_2$ は101(76~136)mmHgから腹臥位171(118~220)mmHgと有意に増加した( $P=0.0001$ )。人工呼吸器の駆動圧( $\Delta P$ =プラトー圧-PEEP)は、14(11~17)cmH<sub>2</sub>Oから13(10~16)cmH<sub>2</sub>Oに有意に減少し( $P=0.001$ )、プラトー圧は26(23~29)cmH<sub>2</sub>Oから25(23~28)cmH<sub>2</sub>Oに有意に減少した( $P=0.04$ )。ARDSの生存率に関しては、近年ではプラトー圧や低一回換気量よりも $\Delta P$ 減少(15~17cmH<sub>2</sub>O以下)の影響が大きいといわれている<sup>12)</sup>。腹臥位を用いなかった理由は、重症の低酸素血症ではなかったため(64.3%)、合併症はわずか12例(11.9%)で(褥瘡5例、低酸素血症2例、挿管チューブの閉塞2例、頭蓋内圧上昇1例認め)、安全に施行されていた。

### 3

## 腹臥位の生理学

ARDSにおける人工呼吸中の腹臥位は酸素化を改善させる。酸素化の改善の理由は、不均

一な換気血流分布が均等になること、肺の質量と形状による効果、胸壁のエラストランスの改善である(図1)<sup>1)</sup>、<sup>15)</sup>。また、二酸化炭素の減少の理由は、過膨張肺ユニットの肺胞換気を減少させ、肺血流の相対的变化によるものとされ、二酸化炭素排泄の高い症例での生存率の改善も報告されている<sup>1)</sup>、<sup>15)</sup>。

背臥位と比較して腹臥位は、背側領域でより負になる垂直の胸腔内圧勾配を逆転させることによって、より均一な一回換気量の換気分布をもたらす(図1)<sup>1)</sup>、<sup>15)</sup>。そして、呼気終末容量が増大し、肺リクルートメントにより肺メカニクスが改善する。腹臥位はまた、心臓と腹部の重力を減少させることによって、背側領域の安静時肺容量を改善する。これと対照的に、肺血流は腹側肺領域に優先的に分布したままであり、したがって、全体的な肺の換気/血流を改善する。さらに、より広い背側胸郭から吊り下げられたより大きい肺組織は、肺全体にわたってより均一な胸腔内圧の分布をもたらし、それが異常な緊張およびストレスの発生を減少させ、人工呼吸器関連肺損傷(VALI)の発症を改善すると考えられており、腹臥位が重度のARDSで死亡率を低下させると思われている<sup>12)</sup>。

腹臥位の生理学的効果<sup>13)</sup>には、以下の多くの因子が関与していると思われる。

### 1) 肺メカニクスの変化

肋骨の圧迫による20%の胸郭コンプライアンスの低下と、肺リクルートメントによる20%の肺コンプライアンスの増加、そして機能的残気量(FRC)が220%増加する。

### 2) 換気血流関係の改善

元々、重力の血流に及ぼす影響は25%以下で、気管支や肺血管のフラクタルな分岐による影響が大きいとされる。肺血管構造は背臥位では背部で大きく、経肺圧は腹側肺から背側肺に減少し、肺胞サイズが小さくなるだけでなく、1回換気中の吸気容量の変化が大きくなる。腹

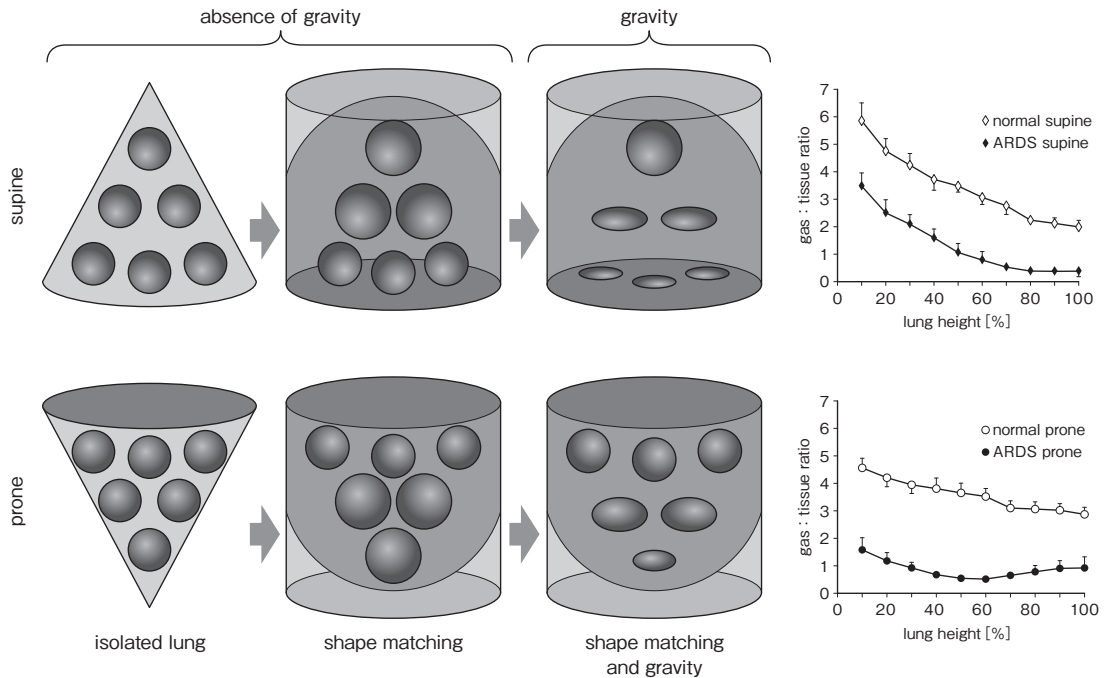


図1 より均質な肺拡張/換気分布〔Gattinoni ほか<sup>15)</sup>より転載〕

孤立した肺は円錐と考えることができ、重力が仮定されていない場合、実質全体を通して同じサイズの肺胞単位を有する。肺が胸郭内に配置されると、より円筒形に適合するためコーンの頂点が伸張され、この領域の肺ユニットのサイズが増加する。重力が加わると、肺の下部のユニットは上のユニットの荷重圧により虚脱する。腹臥位では、重力効果と形状の不一致が反対方向に作用し、より均一な換気分布が得られる。ARDS 肺は、健常肺の 2~3 倍の重量でその荷重圧で背側が虚脱する。腹臥位では、肺虚脱よりも通気肺が大きい。ガスと組織の比 (肺の膨張を表す) は、健常人では背臥位の腹側 6、背側 2.5 が、腹臥位ではそれぞれ 4.5 と 3.5 となり、ストレスや変形が小さい。

臥位では、重力による血流分布の影響が少なく、血流は均等に分布する。

### 3) 換気分布の改善

背臥位では、約 20% の肺組織が腹側に存在し、背側には 50% (心臓の高さより下) が存在する。腹臥位では、心臓は胸骨にほぼ完全にとどまり、左下葉の圧迫が減少する。腹臥肺の面積が大きいほど、腹臥位では肺全体に均等な応力分布が生じるため、肺胞サイズがより均一になる (図 2)<sup>1)</sup>。

### 4) 血流分布の改善

荷重側肺では、シャント血は背臥位で 91% に、腹臥位では 23% に減少し、肺全体でシャ

ント率は 30% も改善する。

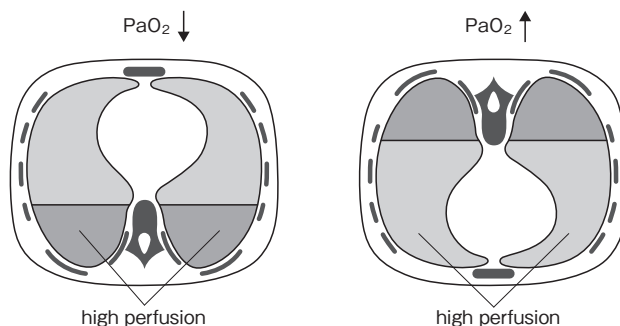
### 5) 気道閉塞の改善

スリンキー効果 (階段を下りる玩具のばね) により、背臥位の背側肺はばねの自重で虚脱するが、腹臥位の腹側の肺の虚脱は減少する (図 2)<sup>1)</sup>。背臥位では、全体的に等重力平面内でも換気分布に大きな不均一性が増加し、PEEP 10 cmH<sub>2</sub>O の付加でも改善しないが、腹臥位では重力の不均一性は少なく、PEEP 10 cmH<sub>2</sub>O を適用するとさらに均一な換気分布が得られる。

### 6) 酸素化の改善

腹臥位による酸素化の改善は、肺損傷スコア

a) original hypothesis



b) confirmed hypothesis

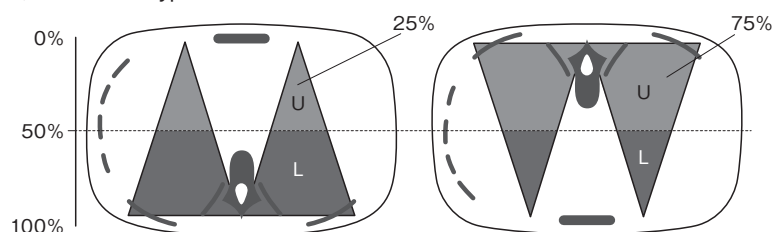


図2 スポンジモデルによる虚脱肺〔Gattinoni ほか<sup>1)</sup>より転載〕

酸素化の改善についての最初の仮説 (a) は、患者が腹臥位にされたときに ARDS に影響されないと考えられていた腹側領域は、より多くの血流を受け換気血流比を最大にするというものであった。しかし確認された仮説 (b) では、肺の背側の肺組織量は、実際には腹側よりも大きかった。肺の虚脱を「その高さの 50% 未満にすることができる荷重圧」と仮定すると、腹側の荷重側肺よりも背側のリクルートされる非荷重側肺がより大きいことが明らかである。

U：上方，L：下方。

や ARDS の原因疾患には関係なく、滲出期の早期 (発症より 3 日以内) の導入で大きい。酸素化の改善のカットオフ値は、 $PaO_2$  や  $PaO_2/FiO_2$  で 20 mmHg あるいは 20% 以上である。酸素化の改善が 20% 以上あったメタ分析では、生存率の改善が期待できる。酸素化の改善に要する時間に関しては、30 分～2 時間以内で改善する早期反応群と、12～20 時間かけて徐々に改善する晚期反応群で特徴は明らかでなく、肺外性 ARDS (肺全体のびまん性型) が肺内性 ARDS (荷重側の無気肺型) よりも改善が早いとの報告もあるが、一致していない。しかし、より早期の長時間の腹臥位が有効であることに

は異論はない。

### 7) 肺胞換気とリクルートメントの改善

ARDS で腹臥位にした際のガス交換の改善には、おそらくいくつかのメカニズムが関与している。それらには、横隔膜の位置や動きの改善、心臓による肺の圧迫の減少、後尾側肺の肺胞内圧の上昇が含まれる。肺胞内圧のより均一な分布は、肺胞サイズおよび局所の呼気終末容量を均一にし、局所のコンプライアンスや一回換気量の分布もより均一とする。さらに、これらの効果は、局所的低酸素性肺血管収縮を減少させ、全体的換気血流のマッチングを増加させることにより、肺血管抵抗の不均一性を減少さ

せる。

#### 8) 排痰効果

背臥位で背側の無気肺をきたした荷重側肺障害では腹臥位により排痰効果を認めるが、ARDSのほとんどでは、目立った気道分泌物のドレナージを伴わずに酸素化が改善する。一方、腹臥位はVAPの発症が背臥位に比べ有意に低いとの報告を多く認める。腹臥位でも頭高腹臥位のほうが、胃食道逆流および誤嚥のリスクが減り、酸素化の改善も高い。

#### 9) 肺胞内液のクリアランスの改善

長時間の腹臥位は、肺リクルートメントでは血管外肺水分量の排泄を促進し、酸素化を改善させる。

#### 10) 血行動態や腹腔内圧の変動

腹臥位による血行動態や腹腔内圧の大きい変動はなく、変動の予防にはエアマットレスが有効とされる。

#### 11) 右心機能の改善

重症ARDSの22~25%に肺性心を伴うが、その理由としては高い陽圧換気が影響しており、肺性心の合併は死亡率を36~60%に増加させてしまう。腹臥位により、酸素化とガス交換が改善し、肺血管抵抗が減少して右心機能を改善させる。

#### 12) 急性脳損傷への影響

急性脳損傷で腹臥位を行うと、頭蓋内圧(ICP)の上昇や脳灌流圧(CPP)の減少が起こる。よって、ベースラインのICP 20 mmHgに維持可能で血行動態が安定している症例に行うべきである。

#### 13) VALIの回避

VALIは、腹臥位での発症が背臥位に比べ約50%少なく、腹臥位により発症を50~80%遅くすることができる。また、炎症性サイトカイン(IL-6)や好中球を減少させた症例では、生存率が改善している。

#### 14) 補助療法(高PEEP, 肺リクルートメント, 血管拡張薬の吸入)の併用の効果

PEEPを0から15 cmH<sub>2</sub>Oに段階的に上げていくと酸素化の改善を認めるが、背臥位よりも腹臥位での改善が大きく、PEEP 13 cmH<sub>2</sub>O(16~20 cmH<sub>2</sub>O)以上でより有効であった。肺リクルートメントはびまん性浸潤肺よりも肺葉性虚脱肺や無気肺において有効であり、腹臥位でのリクルートメントは、背臥位での腹側肺の過剰膨張を抑制して虚脱した背側肺を拡張させ、VALIのリスクを減らす。一酸化窒素(NO)の吸入による血管拡張は、重度のARDSで酸素化を改善するために行われるが、腹臥位との併用により、肺血管抵抗や平均肺動脈の減少などの相加効果をえられる。

## 4

### 腹臥位管理の実際<sup>18), 19)</sup>

腹臥位の適応は重症ARDS(PaO<sub>2</sub>/F<sub>1</sub>O<sub>2</sub><150 mmHg)で、より早期に導入(48時間以内)すると有効で、最良の効果をを得るには、肺保護戦略(プラトー圧<27~30 cmH<sub>2</sub>O, ΔP<15~17 cmH<sub>2</sub>O, 低一回換気量<6 mL/kg)と神経筋遮断薬の併用が有効である。腹臥位をとるには、3~5人で、挿管チューブなどのラインに注意し、学習用ビデオ<sup>\*1</sup>やチェックリストを活用する。事前の準備段階では、酸素化の評価と胃内容物がないことを確認し、挿管チューブ内と口腔内およびカフ上の吸引を行った後にカフ圧を確認して腹臥位にする。腹臥位にしたら心電図の電極を背中に貼付し、血行動態モニタリングのトランスデューサのゼロ設定を行い、顔面・肩・骨盤前部の圧迫の除圧を行う。腹臥位は、成功例では1日少なくとも16時間であり、長時間の腹臥位は虚脱を改善させる。

腹臥位の禁忌には、顔面/頸部の外傷、不安

定な脊柱，新しい胸骨切開術，広範囲腹部熱傷，ICPの上昇，大量の咯血，CPRや除細動が必要な高リスク患者などである<sup>18)</sup>。血行動態が不安定な場合は循環血液量を確認し，腹臥位の適応となるか判断する必要がある，カテコラミン投与は腹臥位の禁忌にはならない。血行動態が不安定な場合は，4分の3の腹臥位<sup>19)</sup>やkinetic bed (40~60°の持続的回旋療法)<sup>13)</sup>を使用する。腹部膨満や腎・肝臓機能障害のある患者の腹臥位では注意が必要で，体位を変える場合はICPをモニタし，体幹を回旋させる場合には頸部は正中位にすべきであり，重症患者では血行動態，肺ガス交換，呼吸器系に悪影響が出るので頭低位は行わない<sup>19)</sup>。

腹臥位の合併症には，口腔・気道内分泌物増加による気道閉塞，挿管チューブの移動や捻れ，血管カテーテルの捻れ，腹腔内圧の上昇，胃残渣の増加，顔面褥瘡，顔面浮腫，挿管チューブによる口唇外傷，腕神経叢損傷(上肢伸展)などが報告されている<sup>18)</sup>。

腹臥位の終了は，PROSEVA研究<sup>14)</sup>では，背臥位に戻しても $\text{PaO}_2/\text{F}_1\text{O}_2 > 150 \text{ mmHg}$ ， $\text{PEEP} < 10 \text{ cmH}_2\text{O}$ ， $\text{F}_1\text{O}_2 < 0.6$ を4時間以上維持可能な状態としているが，最適な時間は不明で，ガス交換・肺メカニクス・臨床経過が改善するまで腹臥位を継続する。

## 5

### 腹臥位と ECMO (体外式膜型人工肺)

ARDS に対する ECMO と腹臥位の併用は，

肺リクルートメントし，酸素化を改善させ VALI の発症を予防し，生命予後が改善する。ARDS で ECMO を使用し腹臥位療法を併用した7論文(97例)の報告では，生存率65%で，ECMOのみは61.2%であった。ECMO中のカニューラの抜去はまったくなく，2論文ではカニューラからの出血があったものの，胸腔ドレーン・挿管チューブの抜去はまったくなかった。52例で合併症はまったくなく，胸腔ドレーンからの出血は1論文で，血行動態の不安定は2論文で報告があるが，合併症はいずれもすぐに解決し，ECMO中の腹臥位は安全に実施可能である<sup>20)</sup>。

2013年の調査では，17論文・672例でARDSはECMOを行っており，208例(31%)はECMO導入前に腹臥位を行っていたが，464例(69%)は行っていなかった。2013年以後の調査では，452例中84例(19%)が腹臥位を行っていたが，2013年以前の調査[210例中116例(55%)]よりも低かった。このことは，データ収集のバイアスがあることと，ECMOと腹臥位の併用の有効性について十分な理解がなされていないためと考えられる<sup>21)</sup>。

ECMO 14例に45回の腹臥位を中央値8(6~10)時間行った報告では，血管ライン，挿管チューブ，胸腔ドレーンの抜去や血流の減少などの合併症は認めず，腹臥位は，酸素化の改善が大きく，安全で信頼できる技術であるとしている<sup>22)</sup>。また近年，168例のECMO装着患者で腹臥位を併用した91例(54%)と併用しなかった77例(46%)の30日生存率は，腹臥位71%(65例)，背臥位43%(33例)，60日生存

\*1 学習用ビデオ：腹臥位の習得には，NEJMvideo<sup>14)</sup>の以下映像が参考になるので参照してほしい(URLは，いずれも2019年6月25日現在で有効)。

- ・ Prone Positioning in Severe Acute Respiratory Distress Syndrome  
[https://www.youtube.com/watch?v=E\\_6jT9R7WJs](https://www.youtube.com/watch?v=E_6jT9R7WJs)
- ・ Prone Tutorial  
<https://www.youtube.com/watch?v=Hd5o4ldp3c0>
- ・ Turning patient from prone to supine  
<https://www.youtube.com/watch?v=vcNDOzVSDIk>

率は腹臥位 62% (57 例), 背臥位 40% (31 例), 90 日生存率は腹臥位 58% (53 例), 背臥位 38% (29 例) と, いずれも腹臥位の併用で高かった<sup>23)</sup>. さらに, 11 病院の ICU で ECMO 装着に腹臥位を併用した 28 例と背臥位 34 例の比較では, 30 日死亡率は腹臥位で 21%, 背臥位で 41% であり, 腹臥位での合併症はなく, ECMO 離脱困難例は少なく, 人工呼吸器離脱率は高かった<sup>24)</sup>. ARDS に対する ECMO 中の腹臥位は, カニューラの抜去や変位の問題および時間の制約がある場合には, kinetic bed を 20~22 時間使用すると合併症を起さず, 腹臥位と同様の効果があったとする報告もある<sup>25)</sup>.

## 6

### おわりに

腹臥位は, 重症 ARDS ( $\text{PaO}_2/\text{F}_i\text{O}_2 < 150$

mmHg) に対し, 発症 48 時間以内の早期に導入し, 最良の効果は, 肺保護戦略 (プラトー圧  $< 27 \sim 30 \text{ cmH}_2\text{O}$ ,  $\Delta P < 15 \sim 17 \text{ cmH}_2\text{O}$ , 低一回換気量  $< 6 \text{ mL/kg}$ ) を併用し, 腹臥位は 16 時間/セッション行うことで得られる. また, 高い PEEP ( $10 \sim 13 \text{ cmH}_2\text{O}$ ), 肺リクルートメント, 血管拡張薬の吸入, ECMO の併用により, 相乗効果を認め, VALI を減少させ, 生存率の有意な改善を認めている. また, ARDS の腹臥位の併用を 16% から 65% に増加させることにより, 追加の長期コストはかかるが寿命が延長された報告があり<sup>26)</sup>, 1 人当たりの ARDS の医療費 (生存から退院まで) が 10 万ドルかかるとすれば, 腹臥位の介入により患者 1 人当たり 5140 ドル安くなるとしている. 今後, 腹臥位の普及による ARDS の生存率の向上や医療費の軽減に期待したい.

#### ■著者連絡先メールアドレス

宮川哲夫: miyagawa@nr.showa-u.ac.jp

#### ■文献

- 1) Gattinoni L, Busana M, Giosa L, et al : Prone Positioning in Acute Respiratory Distress Syndrome, *Semin Respir Crit Care Med* 40(1): 94-100, 2019
- 2) Gattinoni L, Tognoni G, Pesenti A, et al : Prone-Supine Study Group. Effect of prone positioning on the survival of patients with acute respiratory failure, *N Engl J Med* 345(8): 568-573, 2001
- 3) Guérin C, Gaillard S, Lemasson S, et al : Effects of systematic prone positioning in hypoxemic acute respiratory failure: a randomized controlled trial, *JAMA* 292(19): 2379-2387, 2004
- 4) Mancebo J, Fernandez R, Blanch L, et al : A multicenter trial of prolonged prone ventilation in severe acute respiratory distress syndrome, *Am J Respir Crit Care Med* 173(11): 1233-1239, 2006
- 5) Abroug F, Ouanes-Besbes L, Elatrous S, et al : The effect of prone positioning in acute respiratory distress syndrome or acute lung injury: a meta-analysis: areas of uncertainty and recommendations for research, *Intensive Care Med* 34(6): 1002-1011, 2008
- 6) Alsaghir AH, Martin CM : Effect of prone positioning in patients with acute respiratory distress syndrome: a meta-analysis, *Crit Care Med* 36(2): 603-609, 2008
- 7) Taccone P, Pesenti A, Latini R, et al : Prone positioning in patients with moderate and severe acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled trial, *JAMA* 302(18): 1977-1984, 2009
- 8) Sud S, Friedrich JO, Taccone P, et al : Prone ventilation reduces mortality in patients with acute respiratory failure and severe hypoxemia: systematic review and meta-analysis, *Intensive Care Med* 36(4): 585-599, 2010
- 9) Lee JM, Bae W, Lee YJ, et al : The efficacy and safety of prone positional ventilation in acute respiratory distress syndrome: updated study-level meta-analysis of 11 randomized controlled trials, *Crit Care Med* 42(5): 1252-1262, 2014
- 10) Hu SL, He HL, Pan C, et al : The effect of prone positioning on mortality in patients with acute respiratory distress syndrome: a meta-analysis of randomized controlled trials, *Crit Care* 18(3): R109, 2014
- 11) Beitler JR, Shaefi S, Montesi SB, et al : Prone positioning reduces mortality from acute respiratory distress syndrome in the low tidal volume era: a meta-analysis, *Intensive Care Med* 40(3): 332-341, 2014
- 12) Fan E, Del Sorbo L, Goligher EC, et al : An Official American Thoracic Society/European Society of Intensive



- Care Medicine/Society of Critical Care Medicine Clinical Practice Guideline: Mechanical Ventilation in Adult Patients with Acute Respiratory Distress Syndrome, *Am J Respir Crit Care Med* 195(9): 1253-1263, 2017
- 13) Kallet RH : A Comprehensive Review of Prone Position in ARDS, *Respir Care* 60(11): 1660-1687, 2015
  - 14) Guérin C, Reignier J, Richard JC, et al : Prone positioning in severe acute respiratory distress syndrome, *N Engl J Med* 368(23): 2159-2168, 2013
  - 15) Gattinoni L, Taccone P, Carlesso E, et al : Prone position in acute respiratory distress syndrome. Rationale, indications, and limits, *Am J Respir Crit Care Med* 188(11): 1286-1293, 2013
  - 16) Munshi L, Del Sorbo L, Adhikari NKJ, et al : Prone Position for Acute Respiratory Distress Syndrome. A Systematic Review and Meta-Analysis, *Ann Am Thorac Soc* 14(Supplement 4): S280-S288, 2017
  - 17) Guérin C, Beuret P, Constantin JM, et al : A prospective international observational prevalence study on prone positioning of ARDS patients: the APRONET (ARDS Prone Position Network) study, *Intensive Care Med* 44(1): 22-37, 2018
  - 18) Scholten EL, Beitler JR, Prisk GK, et al : Treatment of ARDS With Prone Positioning, *Chest* 151(1): 215-224, 2017
  - 19) Bein T, Bischoff M, Brückner U, et al : Short version S2e guidelines: "Positioning therapy and early mobilization for prophylaxis or therapy of pulmonary function disorders", *Anaesthesist* 64(8): 596-611, 2015
  - 20) Culbreth RE, Goodfellow LT : Complications of Prone Positioning During Extracorporeal Membrane Oxygenation for Respiratory Failure: A Systematic Review, *Respir Care* 61(2): 249-254, 2016
  - 21) Li X, Scales DC, Kavanagh BP : Unproven and Expensive before Proven and Cheap: Extracorporeal Membrane Oxygenation versus Prone Position in Acute Respiratory Distress Syndrome, *Am J Respir Crit Care Med* 197(8): 991-993, 2018
  - 22) Lucchini A, De Felippis C, Pelucchi G, et al : Application of prone position in hypoxaemic patients supported by veno-venous ECMO, *Intensive Crit Care Nurs* 48: 61-68, 2018
  - 23) Guervilly C, Prud'homme E, Pauly V, et al : Prone positioning and extracorporeal membrane oxygenation for severe acute respiratory distress syndrome: time for a randomized trial?, *Intensive Care Med*. 2019. doi: 10.1007/s00134-019-05570-9. [Epub ahead of print]
  - 24) Kim WY, Kang BJ, Chung CR, et al : Prone positioning before extracorporeal membrane oxygenation for severe acute respiratory distress syndrome: A retrospective multicenter study, *Med Intensiva* S0210-5691(18): 30160-30168, 2018
  - 25) Muellenbach RM, Roewer N, Kredel M : Kinetic therapy in ARDS patients treated with extracorporeal membrane oxygenation, *Perfusion* 27(5): 448-449, 2012
  - 26) Baston CM, Coe NB, Guerin C, et al : The Cost-Effectiveness of Interventions to Increase Utilization of Prone Positioning for Severe Acute Respiratory Distress Syndrome, *Crit Care Med* 47(3): e198-e205, 2019

## 呼吸管理における ECMO

医療法人社団康幸会かわぐち心臓呼吸器病院

大山 慶介 OYAMA, Keisuke

竹田 晋浩 TAKEDA, Shinhiro



## 概要

ECMOは、肺保護戦略に基づく人工呼吸管理に継続して行われる呼吸管理方法である。導入と管理に技術と知識をもたなければ、合併症を生じる可能性がある。本稿では、ICUのベッドサイドにおけるECMO管理について必要なことを述べたので、みなさんと共有したい。



Key Word ARDS ECMO カニューレ 管理

## 1

## はじめに

ARDSという広義の重症成人呼吸不全に対するECMO使用目的は、人工呼吸器関連肺傷害(VALI)を防ぎながら、原疾患治療を行い、自己肺の修復を待つための治療期間を確保することである。自己肺の機能が完全消失しても、管理方法を習得していれば、ECMOのみで生命維持に必要な酸素投与と二酸化炭素除去を行うことは可能である。

ECMO管理で大事なことは大きく3つある。

①適応と原疾患治療、②適切なデバイス、③合併症の早期発見である。ECMO治療は、原疾患治療を的確に行い、治療期間をかせぐ生命維

持を目的とした機械管理である。ECMO管理を工夫すれば患者が助かるわけではない。しかし、適切に管理しなければ生命維持ができない。それがECMO管理の難しさであると思われる。本稿では、ECMO管理に必要な知識を各項目に分けて提示する。

APRV: air way pressure release ventilation  
ARDS: acute respiratory distress syndrome  
CT: computed tomography  
ECCO<sub>2</sub>R: extracorporeal CO<sub>2</sub> removal  
ECMO: extracorporeal membrane oxygenation  
ELSO: Extracorporeal Life Support Organization  
HFO: high frequency oscillatory  
HIV: human immunodeficiency virus  
ICU: intensive care unit  
PEEP: positive and expiratory pressure  
PIP: peak inspiratory pressure  
VALI: ventilator-associated lung injury  
VV: veno venous

許諾の都合により、この電子版では図は掲載しておりません

図1 ベルリン定義の治療オプション〔倉橋<sup>1)</sup>より転載〕

## 2

### VV ECMO に対する適応

まず、The International ECMO Network (ECMONet) による position paper にも記載があるように、ECMO 導入のための大前提として人工呼吸管理が適切に行われているか検討が必要になる。ベルリン定義での治療戦略(図1)<sup>1), 2)</sup>に示されたように、腹臥位療法や筋弛緩薬投与、HFO や APRV などを行い、それでも呼吸不全に対する適切な管理が困難な場合に最終的に ECMO を導入する必要がある。現在、ECMO 導入基準として使用されているのは、ELSO ガイドライン(表1)<sup>3), 4)</sup>、CESAR trial での適応基準(表2)<sup>3), 5)</sup>、2011年に New England Journal of Medicine に掲載された ECMO の総説(表3)<sup>3), 6)</sup>が一般的である。

最も一般的な ELSO ガイドラインでは、予測死亡率が50%を超えた時点で考慮が必要であり、80%を超えた時点で ECMO 導入の適応

となる。つまり、重症度が高い場合に導入を決定することとなり、増悪を見込んでなど予防的に ECMO を導入することは推奨されていない。原疾患に関しては「可逆的な」との記載のみで、原疾患に言及している適応基準は認めない。また、客観的に呼吸不全の状態をスコア化しているのが、ELSO ガイドラインや CESAR trial での ECMO の適応基準に使用されている Murray score (769 ページの表4)<sup>3)</sup>である。Murray が作成したスコアであり、 $PaO_2/FiO_2$ 、X線所見、PEEP、肺コンプライアンスをそれぞれ0~4点で点数化し、平均値をとる。2.5~3点以上が ECMO の適応となる。

## 3

### VV ECMO の導入が向いていない場合

高度な人工呼吸管理 ( $F_iO_2$  0.8~0.9、PIP が 30 cmH<sub>2</sub>O、プラトー圧が 30 cmH<sub>2</sub>O 以上) を 1 週間継続していることや、併存疾患に予後不

表1 ELSO ガイドラインにおける ECMO の適応〔片岡ほか<sup>3)</sup>より転載〕

適応基準	
① 予測死亡率が 50% 以上のときは考慮とし、80% 以上のときに適応とする ・ 死亡予測が 50% 以上とは、Murray score が 2～3 か $F_{I}O_2$ が 90% 以上の状態で $PaO_2/F_{I}O_2$ 比 < 150 ・ 死亡予測が 80% 以上とは、Murray score が 3～4 か $F_{I}O_2$ が 90% 以上の状態で $PaO_2/F_{I}O_2$ 比 < 80 ② 喘息や permissive hypercapnia のために $PaCO_2$ が 80 mmHg を超えてしまう場合や $PIP < 30$ cmH <sub>2</sub> O を達成できない場合 ③ 重症な air leak がある場合	
除外基準	
絶対的な禁忌はなく、それぞれの患者においてリスクとベネフィットを考えなければならない	
相対的禁忌	① $F_{I}O_2 > 90\%$ 、 $PIP > 30$ cmH <sub>2</sub> O のような人工呼吸設定が 7 日以上続いている場合 ② 薬物による免疫不全 (好中球数 < 400 $\mu$ L) ③ 現在または最近の頭蓋内出血がある場合

注：年齢には禁忌はないが、年齢が上がれば上がるほどリスクも上昇する。

表2 CESAR trial における ECMO 適応基準〔片岡ほか<sup>3)</sup>より転載〕

適応基準	
・ 18～65 歳 ・ 可逆的な呼吸不全 ・ Murray score が 3 点以上 (Murray score : $PaO_2/F_{I}O_2$ 比, PEEP, 肺コンプライアンス, X 線所見) もしくはあらゆる治療を行っても $pH < 7.2$ となってしまう非代償性高二酸化炭素症 ・ Murray score が 2.5 以上で上記基準に相当する場合	
除外基準	
・ $PIP > 30$ cmH <sub>2</sub> O や $F_{I}O_2 > 80\%$ が 7 日以上続いている場合 ・ 脳出血 ・ その他ヘパリンが禁忌となる場合 ・ 治療継続不可能な場合	

表3 New England Journal of Medicine による重症 ARDS における ECMO の適応と禁忌〔片岡ほか<sup>3)</sup>より転載〕

適応	
・ 重度な低酸素血症 (改善可能な呼吸不全患者に対して少なくとも 6 時間は PEEP を 15～20 cmH <sub>2</sub> O かけても $PaO_2/F_{I}O_2$ 比 < 80 となる場合) ・ 標準的な人工呼吸管理を行っても $pH < 7.15$ となるような高二酸化炭素症 ・ 標準的な人工呼吸管理を行ってもプラトー圧が 35～40 cmH <sub>2</sub> O を超えてしまう場合	
相対的禁忌	
・ プラトー圧が 30 cmH <sub>2</sub> O を超える期間が 7 日を超える場合 ・ $F_{I}O_2 > 80\%$ を超える期間が 7 日を超える場合 ・ 血管確保に制限がある場合 ・ 重度の不可逆的脳障害がある、または、治療不能な悪性腫瘍などの ECMO を施行するうえでのメリットがない場合	
絶対的禁忌	
・ 抗凝固療法ができない場合	

表4 Murray score についての説明〔片岡ほか<sup>3)</sup>より転載〕

① PaO <sub>2</sub> /F <sub>i</sub> O <sub>2</sub> 比 (20 分間の 100%酸素投与後)		③ PEEP	
≥300	0 点	≤5 cmH <sub>2</sub> O	0 点
225 ~ 299	1 点	6 ~ 8 cmH <sub>2</sub> O	1 点
175 ~ 224	2 点	9 ~ 11 cmH <sub>2</sub> O	2 点
100 ~ 174	3 点	12 ~ 14 cmH <sub>2</sub> O	3 点
<100	4 点	≥15 cmH <sub>2</sub> O	4 点
② X線所見 (肺を 4 等分してその浸潤影の領域数)		④ 肺コンプライアンス：一回換気量 (PIP-PEEP)	
肺胞浸潤影なし	0 点	≥80	0 点
肺野の 1/4 に肺胞浸潤影	1 点	60 ~ 79	1 点
肺野の 2/4 に肺胞浸潤影	2 点	40 ~ 59	2 点
肺野の 3/4 に肺胞浸潤影	3 点	20 ~ 39	3 点
肺野の 4/4 に肺胞浸潤影	4 点	≤19	4 点

①~④の4つの所見の合計点の平均。

良な疾患 (HIV 感染) があること、重度の不可逆的脳障害があがっていることも共通している。

しかし、人工呼吸管理期間に関しては、高い生存率の治療成績を残す ECMO センターを有するスウェーデンのカロリンスカ大学での講義によると、近年では、1 週間の高度な人工呼吸設定が継続していても絶対的禁忌ではなく、個々の症例に応じて考慮すべきであり、病態が可逆性である可能性があれば考慮してもよいとされている。相対的に使用制限を考慮される事項として、高度肥満、HIV 感染/肝炎、慢性疾患での急性増悪、肺高血圧症に伴う 2 次性右心不全、骨髄移植がある。これらは、予後不良な疾患が併存症にないか、管理中に感染や穿刺部出血などの合併症が出現しやすい状況はないかというメッセージである。

また、年齢に関して数値化して定めているものではなく、患者ごとに適宜考慮が必要であり、退院生存が望めることや長期予後を見込める状態であるかを検討する必要がある。

## 4

### ECMO 導入に関するポイント

ECMO の管理に関しては、導入期と ICU 入室後の維持期に大きく分けて考える必要がある。導入時に最も大きくかわるのは、カニューレの選択とアプローチ部位である。維持に関しては、遠心ポンプ、人工肺、ECMO 回路でのトラブルをいかに早く察知できるかが合併症対策となる。

#### 4-1 カニューレ

カニューレという単語は、ECMO に接続するカテーテルを意味している。基本的には、できるだけ大口径でショートサイズのカニューレを選定する必要がある。なぜなら、カニューレの抵抗は、直接の長さ に 比例し、内径の 4 乗に反比例するためである。カニューレに関しては、リサーキュレーションを防ぐことより、脱血量の安定さと、酸素投与量を一定に保持して脱血不良に伴う輸液負荷を減らしていくことが、長期管理を目指すのであれば必須となる。また、覚醒していくと首の可動性も上がるた

め、kinking (屈曲) しにくいワイヤ補強されたカニューレを使用することが望ましいと思われる。これらに関しては、「望ましい」というだけで、ほかのものの使用を禁忌とするものではない。しかし、これ以外の状態で管理を行うには、カニューレ位置や輸液量などの工夫が必要になる可能性が高い。

#### 4-2 アプローチ部位

基本的には、アプローチ部位は大腿静脈か内頸静脈になるが、施設ごとに採用しているカニューレによって決まる。ショートサイズのカニューレを採用しているのであれば、大腿静脈より血管径が太いことと前述の理由も踏まえ、右内頸静脈を脱血側にすることを推奨する。大腿静脈を選ぶことが悪いわけではないが、カニューレの長さにより、必要血流量を獲得するには、脱血不良を発生させやすく、後腹膜出血などの合併症の際には静脈径が圧排され、さらに脱血不良を生じる可能性が高くなる。しかし、内頸静脈の使用が困難な場合には、大腿静脈脱血→大腿静脈送血を選ぶことを推奨する。左内頸静脈は基本的には選定しないことが多い。なぜなら、腕頭静脈から上大静脈への走行は蛇行しており、カニューレの先端が接触しやすいため、脱血不良を起こすたびにカニューレを抜浅する必要があるが、カニューレの抜去事故が生じる可能性が高く、また、留置そのものが静脈系を損傷する可能性が高くなるためである。

## 5

### 管理に関するポイント

管理に関しては、個々の症例に応じて必要なことは異なると思われるが、基本的な管理項目は存在すると考える。当院では、ICUの看護

師および臨床工学技士が連携して、紙ベースの管理項目を掲載し施行している。なお、当院では医療安全委員会活動の一貫として、ECMOチームを設置し、導入・管理に関する問題点の整理、院内教育の業務を行っている。

#### 5-1 プライミング時のチェックリスト使用とレコード作成 (図2)

プライミング時は、必ずチェックリストを使用して確認する。また、レコードを作成し、後日検討ができるように記録している。

#### 5-2 ECMO 指示簿 (772 ページの図3)

ECMO 中は目標とする流量と sweep gas の記載を指示簿に行っている。流量に関しては、試験的に施行しているところであるが、 $\pm 0.5$  L/min 程度を許容範囲としている。変化があった場合は臨床工学技士もしくは集中治療医に報告してもらい、適宜調整を行うようにしている。

#### 5-3 ECMO 経過表 (773 ページの図4)

設定項目および回路内圧、アラーム設定、凝固系に関しては1時間ごとに記載している。また、各項目に記載する職種を明確にしている。物品チェックや人工肺前後の血液ガス、回路内圧チェックなどは、日勤・夜勤の交代時に施行している。

#### 5-4 移動時に使用するチェックリスト (774 ページの図5)

ECMO 管理では原疾患に対する CT フォローを行う必要性が高い。検査室への移動にはリスクがあると思われるが、画像診断を行わずに治療方針を決定することのほうがリスクが高いと考える。当院では、記載の通りに、検査室への移動前後に臨床工学技士が点検した後に移

a)

チェックリスト 機器No.000 《回路組立時》 確認者 _____		《プライミング後》 確認者 _____	
<input type="checkbox"/> 回路接続位置・組み	<input type="checkbox"/> 圧モニタラインの向き (3カ所)	<input type="checkbox"/> 結束バンドによる接続部の固定 (8カ所)	<input type="checkbox"/> 三方活栓のロック・蓋の緩み
<input type="checkbox"/> 酸素チューブの接続	<input type="checkbox"/> 人工肺の向き (血液出口が上向き)	<input type="checkbox"/> Pressure Boxの電源・回路準備	<input type="checkbox"/> 酸素ブレンダの設定 (F <sub>O2</sub> =1.0, FLOW=0)
<input type="checkbox"/> リザーバ下をクランプ	<input type="checkbox"/> 本体動作確認 <input type="checkbox"/> AC主電源ON・充電確認	<input type="checkbox"/> 回路接続位置・緩み	<input type="checkbox"/> 三方活栓のロック・蓋の緩み
《物品》		<input type="checkbox"/> 回路内気泡の有無	<input type="checkbox"/> 遠心ポンプの装着
<input type="checkbox"/> 鉗子 5本	<input type="checkbox"/> 生理食塩水 1.5 L	<input type="checkbox"/> 結束バンドによる接続部の固定 (8カ所)	<input type="checkbox"/> ケラチンクリーム塗布 (流量表示)
<input type="checkbox"/> ハンドクランク	<input type="checkbox"/> 各種シリンジ	<input type="checkbox"/> 人工肺の向き (ガス入口が上向き)	<input type="checkbox"/> 遠心ポンプの0点
<input type="checkbox"/> 懐中電灯	<input type="checkbox"/> 三方活栓	<input type="checkbox"/> 清潔回路前後のクランプ (4カ所)	<input type="checkbox"/> 結束バンドによる接続部の固定 (8カ所)
<input type="checkbox"/> ケラチンクリーム	<input type="checkbox"/> Qサイト14個	<input type="checkbox"/> 脱血圧モニタラインのプライミング	<input type="checkbox"/> 人工肺の向き (ガス入口が上向き)
<input type="checkbox"/> サランラップ®	<input type="checkbox"/> 脱血圧測定圧カセパレータ	《導入後》 確認者 _____	<input type="checkbox"/> 清潔回路前後のクランプ (4カ所)
<input type="checkbox"/> 酸素ポンベ残圧 ( ) MPa		<input type="checkbox"/> 酸素の吹送	<input type="checkbox"/> 脱血圧確認, アラーム ON
		<input type="checkbox"/> 送・脱血の色	<input type="checkbox"/> Flowアラーム ON
		<input type="checkbox"/> ACT・血ガス測定	<input type="checkbox"/> AC主電源ON・充電確認
			<input type="checkbox"/> 送・脱血管タイガン
経過・特記事項 _____			

b)

ECMO Record No.2018-

Date : / / ( )	ID	Name :
Birthday : / /	Age :	Sex :
HT : cm	BW : kg	BSA : m <sup>2</sup>
Diag :		
導入目的 : ECPR ・ Cardiac ECMO ・ Respiratory ECMO		
補助循環法 : V-V ECMO ・ V-A ECMO ・ V-VA ECMO ・ VV-A ECMO		
PUMP ON : 月 日 時 分	回路交換回数 : 回	
PUMP OFF : 月 日 時 分	旅行時間 : 時間 分 ( 日)	
Others : <input type="checkbox"/> IABP <input type="checkbox"/> T-PM <input type="checkbox"/> CRRT <input type="checkbox"/> HD		

Circuit

Tubing : ECMO-P (Lot. )	Oxygenator : BIOCUBE 6000・Excelung NSH-R
Pump : Rota Flow (Lot. )	(Lot. )
Reservoir : Dideco Cardiotomy Reservoir	Saturation Cell : TMC38
(Lot. )	(Lot. )

図2 プライミング時に使用するチェックリスト(a), 作成するレコード(b)

動している。移動では、医師1名、臨床工学技士2名、看護師1名を最低限の人数としている。

### 5-5 回路内血栓

回路内血栓に関しては1日2回、臨床工学

技士および看護師が共同で確認用の用紙(775ページの図6)を用いてチェックを行うようにしている。回路内、特に人工肺後、送血側に血栓が付着し、浮遊性、可動性が高いものや、約5mm以上のものを認めた場合には該当の回路をトリミングし、部分交換を積極的に行うようにしている。人工肺内に生じた血栓に関して

ICU ECMO 指示簿		ID ( )										Name ( )			
日付	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
時間	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	
ECMO 流量 [L/min]															
F <sub>I</sub> O <sub>2</sub> [%]															
sweep gas 流量 [L/min]															
Dr.															
Ns.															

日付	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
時間	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
ECMO 流量 [L/min]														
F <sub>I</sub> O <sub>2</sub> [%]														
sweep gas 流量 [L/min]														
Dr.														
Ns.														

図 3 ECMO 指示簿

は、ガス交換能の低下を認めない限り、交換は施行していない。

6

ECMO 患者の合併症

ECMO 管理において大事なことは、導入した原疾患に対する治療と抗凝固療法、および感染対策である。また、高い生存率を残すために大事なことは、合併症を生じないようにすることであり、生じたとしても迅速に対応することである。

合併症には、ECMO 回路関連合併症と患者関連合併症 (775 ページの表 5)<sup>6), 7)</sup> がある。ECMO 回路関連合併症の発生率は、人工肺不全が 17.5%、人工肺内血栓が 12.2%、人工肺以外の回路内血栓が 17.8% である。患者関連合併症では、カニューレ穿刺部出血が 17.1%、消化管出血が 5.1%、頭蓋内出血が 3.8% である。感染症 (培養にて確認されているもの) に関しては 21.3% 程度ある。以上のように、ECMO 管理中に合併症を生じる可能性は高い。

人工肺不全や回路内血栓に対しては、ポンプや人工肺の部分的交換を行う必要がある。これに関しては、普段からシミュレーショントレーニングを重ねる必要がある。リーダーは患者側と ECMO 側の両者の状況を確認しながら、バイタル管理を行い、プロトコルに従って臨床工学技士および ICU 看護師とともに回路交換を行う必要がある。

出血に関しては、カニューレを行う際に十分に注意を払う必要がある。海外ではエコーガイド下にて穿刺を行うことが多く、わが国では、おそらく多くの施設で透視装置を使用して挿入することが多いと思われる。また、高度肥満患者などの場合は、外科的に挿入することが望ましい場合がある。カニューレの挿入は一番重要な要素であり、穿刺の位置や止血操作が、その後の長期管理に影響を及ぼす可能性がある。後腹膜腔出血や外出血などの合併症は致命傷になる可能性がある。抗凝固療法を継続する必要があるため、トラネキサム酸投与や早期にカテーテル止血術が必要になる場合もある。また、急性期は酸素需要量が多く、輸血を必要以上に行う場合がある。



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23																																
ECMO 総時間 [hr]																																																								
ポンプ回転数 [rpm]																																																								
ECMO Flow [L/min]																																																								
Sweep gas [L/min]																																																								
FiO <sub>2</sub> [%]																																																								
ECMO 熱交換器設定温度 [°C]																																																								
平均動脈圧 [mmHg]																																																								
CVP [mmHg]																																																								
P1: 脱血圧 [mmHg]																																																								
P2: 肺前 [mmHg]																																																								
P3: 肺後 [mmHg]																																																								
P4: ガス [mmHg]																																																								
EtCO <sub>2</sub> [mmHg]																																																								
SpO <sub>2</sub> [%] (部位 )																																																								
体温 [°C] (部位 )																																																								
脱血回路 cSvO <sub>2</sub> [%]																																																								
Hct [%]																																																								
ヘパリン total 流量 [mL/hr]																																																								
ヘパリンボラス [mL]																																																								
APTT [sec]																																																								
ECMO Flow [L/min] [下限]																																																								
P1: 脱血 [mmHg] [上限/下限]																																																								
P2: 肺前 [mmHg] [上限/下限]																																																								
P3: 肺後 [mmHg] [上限/下限]																																																								
P4: ガス [mmHg] [上限/下限]																																																								
NS.																																																								
(注) 1 田2 回 器 器	<table border="1"> <thead> <tr> <th>チェック項目</th> <th>9時</th> <th>17時</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>電源確認</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ヘアンの確認 (5本)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>回路内血栓確認</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>NS.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>																								チェック項目	9時	17時	電源確認			ヘアンの確認 (5本)			回路内血栓確認			NS.																			
チェック項目	9時	17時																																																						
電源確認																																																								
ヘアンの確認 (5本)																																																								
回路内血栓確認																																																								
NS.																																																								
(注) 2 回 器 器	<table border="1"> <thead> <tr> <th>チェック項目</th> <th>9時</th> <th>17時</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PH</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>pCO<sub>2</sub></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>pO<sub>2</sub></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sat O<sub>2</sub></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ME</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>																								チェック項目	9時	17時	PH			pCO <sub>2</sub>			pO <sub>2</sub>			Sat O <sub>2</sub>			ME																
チェック項目	9時	17時																																																						
PH																																																								
pCO <sub>2</sub>																																																								
pO <sub>2</sub>																																																								
Sat O <sub>2</sub>																																																								
ME																																																								
(注) 3 回 器 器	<table border="1"> <thead> <tr> <th>チェック項目</th> <th>9時</th> <th>17時</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1: 脱血</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>P2: 肺前</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>P3: 肺後</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>P4: ガス</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ME</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>																								チェック項目	9時	17時	P1: 脱血			P2: 肺前			P3: 肺後			P4: ガス			ME																
チェック項目	9時	17時																																																						
P1: 脱血																																																								
P2: 肺前																																																								
P3: 肺後																																																								
P4: ガス																																																								
ME																																																								
(注) 4 回 器 器	<table border="1"> <thead> <tr> <th>チェック項目</th> <th>9時</th> <th>17時</th> <th>22時</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>本体・熱交換器・電源</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>回路・人工肺・遠心ポンプ</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ルアー (12 or 14カ所)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>加圧バスキ (Aマークまで加圧)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>アラーム</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>経過記録確認</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ME</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>																								チェック項目	9時	17時	22時	本体・熱交換器・電源				回路・人工肺・遠心ポンプ				ルアー (12 or 14カ所)				加圧バスキ (Aマークまで加圧)				アラーム				経過記録確認				ME			
チェック項目	9時	17時	22時																																																					
本体・熱交換器・電源																																																								
回路・人工肺・遠心ポンプ																																																								
ルアー (12 or 14カ所)																																																								
加圧バスキ (Aマークまで加圧)																																																								
アラーム																																																								
経過記録確認																																																								
ME																																																								

図 4 ECMO 経過表

a) 移動前

日付	/	/	/	/	/	/	/
回転数 [bpm]							
Flow [L/min]							
F <sub>I</sub> O <sub>2</sub> [%]							
Sweep gas [L/min]							
酸素ポンベ残量が5 MPa以上							
酸素チューブの接続 (酸素ポンベ⇒人工肺)							
鉗子5本							
サイン							

b) 移動後

日付	/	/	/	/	/	/	/
回転数 [bpm]							
Flow [L/min]							
F <sub>I</sub> O <sub>2</sub> [%]							
Sweep gas [L/min]							
ガスアウトレットへの接続							
酸素チューブの接続 (ガスブレンダー⇒人工肺)							
回路固定							
AC主電源ON・充電確認							
酸素ポンベ残量が5 MPa以上							
鉗子5本							
サイン							

c) ICU 帰室時

日付	/	/	/	/	/	/	/
冷温水槽の接続							
脱血圧モニタリング, アラーム設定 (±50 mmHg)							
肺前圧モニタリング, アラーム設定 (±30 mmHg)							
肺後圧モニタリング, アラーム設定 (±30 mmHg)							
ガス圧モニタリング, アラーム設定 (±2 mmHg)							
Flowアラーム設定 (-0.5 L/min)							
タイガン							
三方活栓の蓋をQサイト (シェアプラグ) へ変更 (足送血14個 or その他12個)							
ハンドクランク							
空気混入時の物品							
緊急対応セット (人工肺/遠心ポンプ交換用物品)							
サイン							

図5 移動時チェックリスト

ECMO では長期間カニューレを留置することから、穿刺部感染を起こしたり、ときには人工肺感染を起こしたりすることがある。当初から予防的に抗生物質を使用する施設や、状態に

応じて抗生物質を投与する施設がある。カロリンスカ大学などの高い生存率の治療成績を残すECMO センターでは、多くの症例にバンコマイシンの持続投与が行われており、血中濃度の

# ECMO回路 血栓確認図

※血栓確認後はDrに報告を！！

ID \_\_\_\_\_ Name \_\_\_\_\_

使用開始日 \_\_\_\_\_

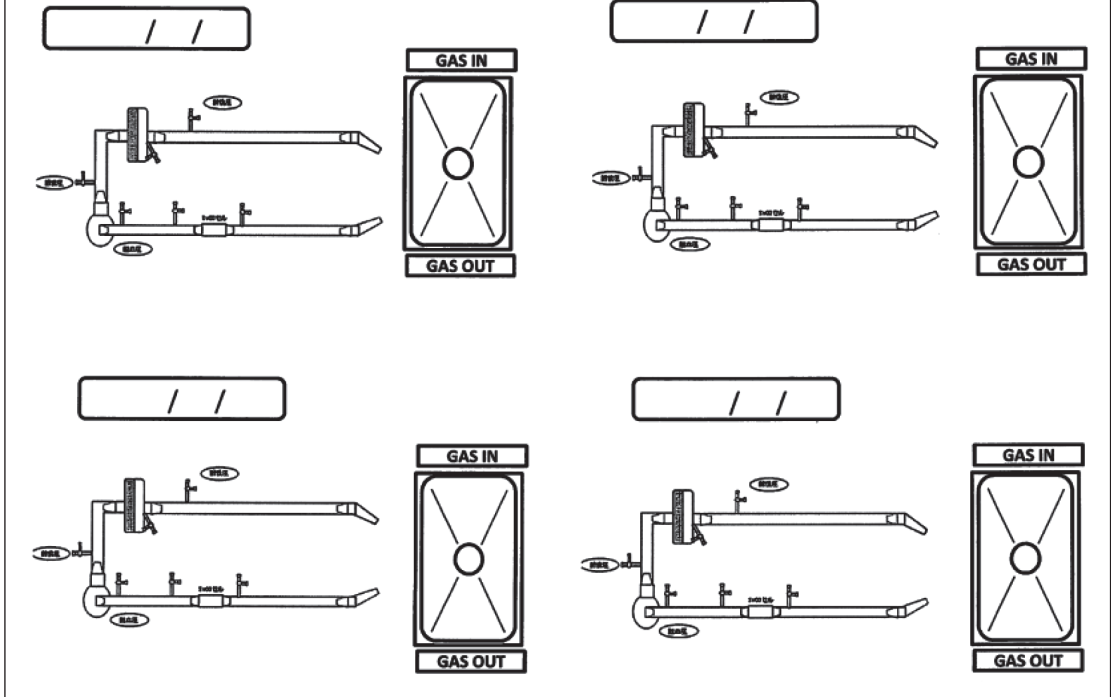


図6 回路内血栓のチェックに用いる確認用紙

表5 ECMOの合併症と頻度〔青景ほか<sup>7)</sup>より転載〕

	項目	発生率 [%]
回路関連合併症	人工肺不全	17.5
	回路内血栓	
	▶人工肺内	12.2
	▶人工肺以外の回路内	17.8
	カニューレ関連合併症	8.4
	その他の回路関連合併症	7.9
患者関連合併症	出血	
	▶外科創部出血	19.0
	▶カニューレ穿刺部出血	17.1
	▶気管内・肺胞出血	8.1
	▶消化管出血	5.1
	▶頭蓋内出血	3.8
	溶血	6.9
	播種性血管内凝固	3.7
感染症(培養で確認されているもの)	21.3	

測定を行いながら ECMO 中に継続される。また、敗血症症例であれば、メロペネムの血中濃度を測定しながら持続投与されている。穿刺部にはヒビテン® パッチが添付されており、消毒を定期的に行っている。原疾患治療にかかわらない ECMO 管理における抗生物質に関しては種々の意見があると思われるが、高い生存率を維持している海外の ECMO センターで行われていることには意味があると思われる。

## 7

### ECMO 管理に適切な施設

海外の ECMO センターは年間 20 例以上の症例管理を行っており、専門的トレーニングを

行った ECMO specialist による ECMO チームが管理を行っている。周辺施設からコンサルトがあり、ECMO チームがコンサルトのあった病院まで ECMO 導入可能な資機材をもって移動し、その病院の担当医師と症例について議論を行い、ECMO 導入を行う。しかし、適応基準を満たしていなければ ECMO 導入は行わず、症例に対して介入可能な治療を行い、改善傾向であることを確認し撤退することもある。患者や資機材の搬送のトレーニングもっており、ECMO 搬送専用の救急車やヘリコプター、小型飛行機もある。ECMO の資機材は重装備のイメージがあるが、海外には CARDIOHELP SYSTEM (Maquet Cardiopulmonary GmbH) という小型の ECMO 装備があり、移動をより容易にできる。他国からの要請に 8 時間以上の長時間かけて移動する場合もあるが、彼らにとっては日常であり、特別なイベントではない。

現在のわが国では自施設に ECMO 装備を有する施設が多いが、年間 20 例以上を扱う施設は限られている。(一社)日本呼吸療法医学会による ECMO プロジェクト<sup>8)</sup> 開始以降、自施設で ECMO トレーニングを行い、日々研鑽する施設が増えている。しかし、わが国全体でのネットワーク形成は完成されておらず、ECMO 適応のある疾患が ECMO を使用できる施設に搬送されているかを明らかにするデータはない。わが国も ECMO センターを設立し、症例の集約化を図る流れがあり、今後の動向が気になるところである。今後も、ECMO 治療成績のわが国全体での情報の集約化が必要であり、ECMO 成績の向上を目指す必要がある。

---

■著者連絡先メールアドレス

大山慶介 : keke03261985@gmail.com

#### ■文献

- 1) 倉橋清泰 : 急性呼吸窮迫症候群 (ARDS), クリニカルエンジニアリング 30(1): 30-38, 2019
- 2) Ferguson ND, Fan E, Camporota L, et al : The Berlin definition of ARDS: an expanded rationale, justification, and supplementary material, Intensive Care Med 38(10): 1573-1582, 2012
- 3) 片岡 惇, 安田英人 : 成人の適応疾患とその効果に関するエビデンス, INTENSIVIST 5(2): 331-342, 2013
- 4) Extracorporeal Life Support Organization (ELSO) patient Specific Supplements to the ELSO General Guideline
- 5) Peek GJ, Mugford M, Tiruvoipati R, et al : Efficacy and economic assessment of conventional ventilatory support versus extracorporeal membrane oxygenation for severe adult respiratory failure (CESAR): a multicenter randomized controlled trial, Lancet 374(9698): 1351-1363, 2009
- 6) Brodie D, Bacchetta M : Extracorporeal membrane oxygenation for ARDS in adults, N Engl J Med 365(20): 1905-1914, 2011
- 7) 青景聡之, 竹田晋浩 : VV ECMO 導入から離脱までの管理方法, INTENSIVIST 5(2): 343-352, 2013
- 8) 一般社団法人日本呼吸療法医学会 : ECMO プロジェクト  
<http://square.umin.ac.jp/jrcm/contents/ecmo/index.html> (2019 年 6 月 21 日現在)