

JSEPTIC クイズ第 28 弾

(2022 年 12 月実施)

J S E P T I C 症例クイズ

クイズ作成者

自治医科大学附属さいたま医療センター 麻酔科集中治療部

西山 聖也 / 増山 智之

解答と解説

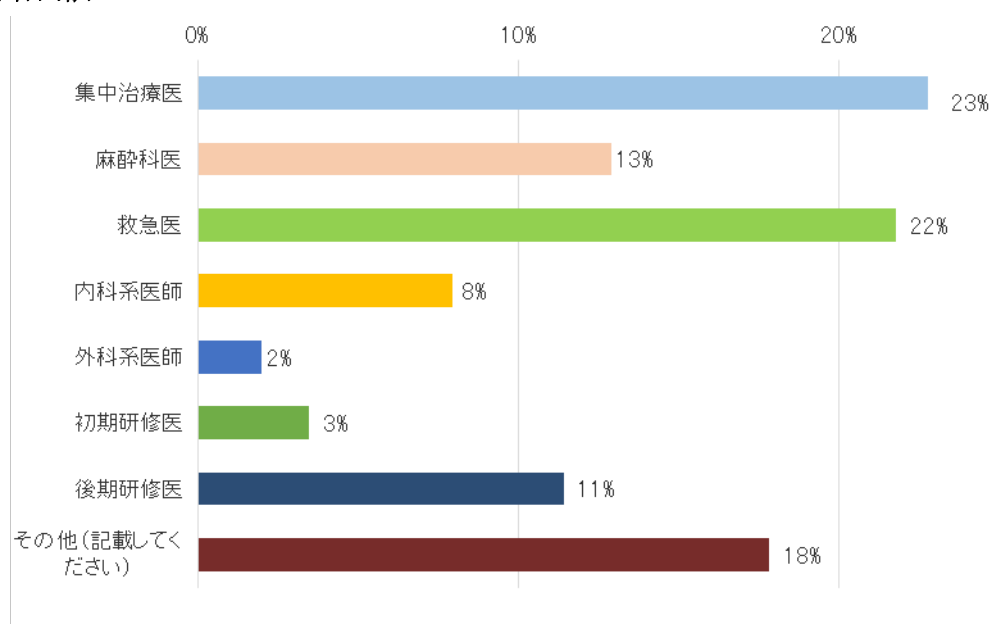
【はじめに】

食道内圧測定は胸腔内圧の推定のために古くは50年以上前から行われてきた手法ですが、技術的要素や計算の複雑さから主に研究の場で用いられてきました。臨床で使用可能となっても2014年の時点で世界でも使用している施設は少なかったようです¹⁾。

しかしCOVID-19の世界的流行によって、以前とは比べものにならないほど重症呼吸不全の患者を診療する機会が増え、肺保護戦略のアップデートとともに食道内圧測定を導入した施設も少なくないのではないのでしょうか。そこで今回、食道内圧、経肺圧に関するクイズを作成しました。

今回は2023年1月9日の時点で202名の方が解答してくださいました。問題と皆様の解答、正答および解説を掲載いたします。

<解答者内訳>



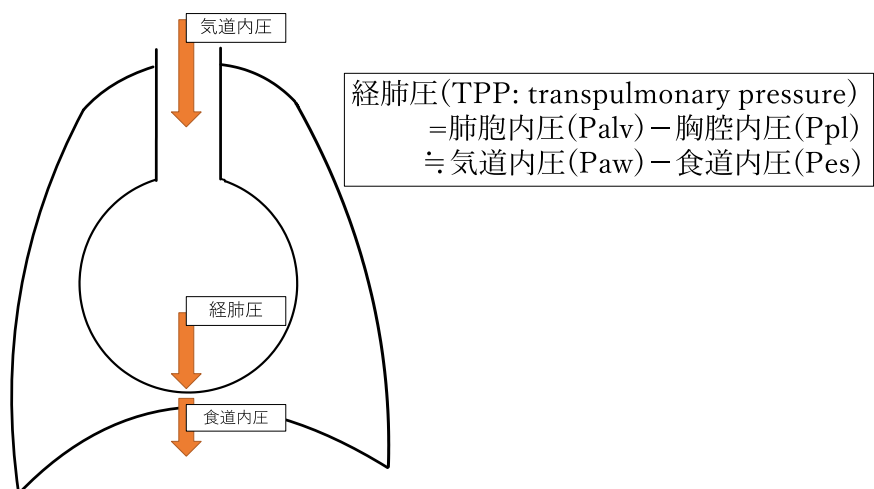
※その他 (具体的に)

- | | | | |
|-----------------|----|---------------|---|
| ・ 臨床工学技士 (CE) | 15 | ・ 小児救急医 | |
| ・ 看護師 | 7 | ・ 救急科 | |
| ・ クリティカルケア認定看護師 | | ・ 専門医技士 | |
| ・ 特定ケア看護師 | | ・ 技士 | |
| ・ 理学療法士 | | ・ コメディカル | |
| ・ 作業療法士 | | ・ 企業/医療機器メーカー | 2 |
| ・ 小児科医 | | ・ 不明 | 2 |

以下のクイズに教えてください。

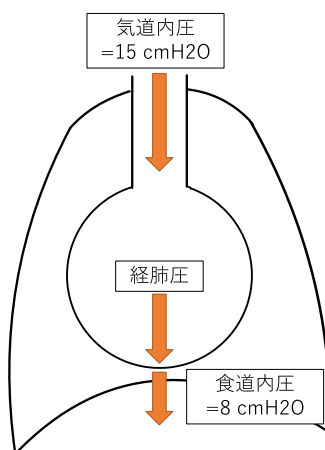
Q1.

食道内圧を測定することで得られる経肺圧は肺胞の内側と外側の圧差を表しており、実際に肺にかかっている圧とも言えます。経肺圧は以下のように計算されます²⁾。

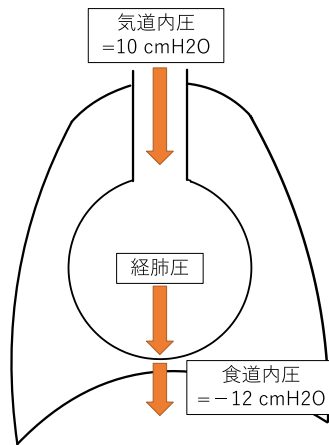


■以下に示す例で経肺圧が最も高いと予想されるものはどれか？

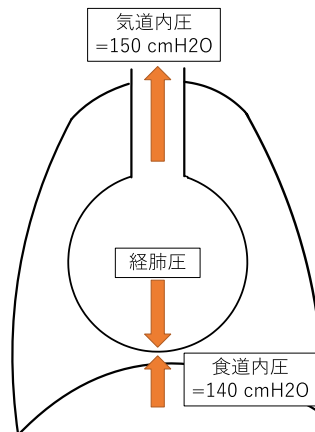
a. 深鎮静管理中のARDS患者。自発呼吸なし。吸気時、気道内圧15cmH₂O、食道内圧8cmH₂O。



- b. 換気困難が予想され、自発呼吸を温存したまま気管挿管されたばかりの COVID-19 患者。吸気時、気道内圧 $10\text{cmH}_2\text{O}$ 、食道内圧 $-12\text{cmH}_2\text{O}$.

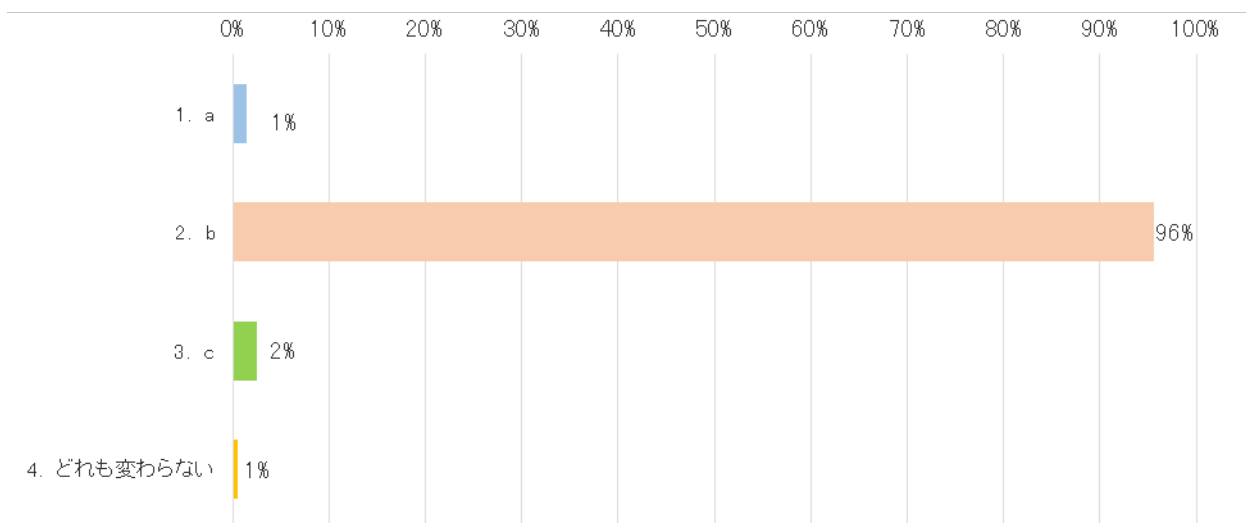


- c. 特に既往のないトランペット奏者。呼気時、気道内圧 $150\text{cmH}_2\text{O}$. 食道内圧 $140\text{cmH}_2\text{O}$.



1. a
2. b
3. c
4. どれも変わらない

<皆様の解答>



Q1. 解答・解説

正答： 2.

各例(a. ~c.)の経肺圧(TPP)は以下の通りです。

- a. $TPP=15-8=7\text{cmH}_2\text{O}$
- b. $TPP=10-(-12)=22\text{cmH}_2\text{O}$
- c. $TPP=150-140=10\text{cmH}_2\text{O}$

解説：

一見、気道内圧が高い a. よりも b. の患者の方が経肺圧、つまり肺にかかる圧が高くなることに着目してください。強い自発呼吸があるとその分だけ食道内圧は陰性となり、結果として経肺圧が高くなります。

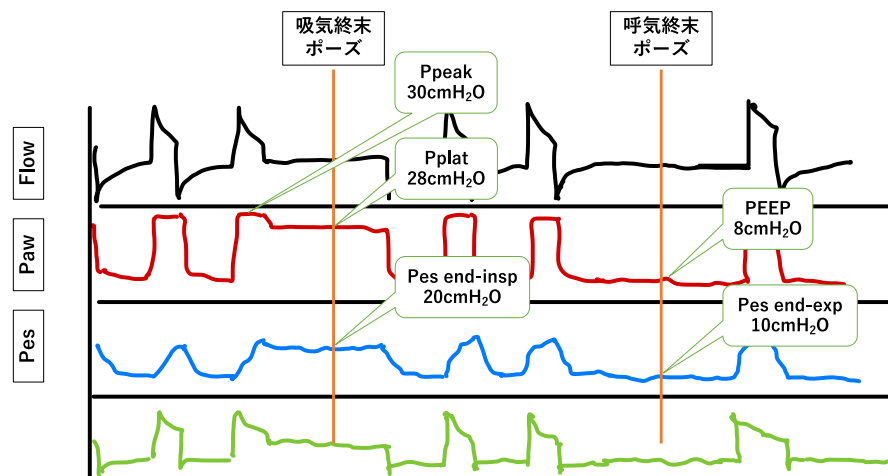
例として pressure support ventilation (PSV) を行なっている際に大きくなった一回換気量を減らそうとサポート圧(PS)を下げて、一回換気量が変わらなかった、という経験はないでしょうか？この時、食道内圧を測定すると、まさに患者自身の自発呼吸の成分が増大している(食道内圧が大きく陰圧に振れる)のを視覚的に理解することができます。

c. について、気道内圧が著しく上昇するトランペット奏者で肺が破れないのは、同時に胸腔内圧も上昇しており経肺圧は上昇しないためと考えられています²⁾。

Q2.

60代男性。腹部大動脈瘤破裂に対して緊急で血管置換術後。術後は挿管のままICUへ入室したが、大量輸液・輸血による浮腫、および残存する後腹膜血腫による腹部コンパートメント症候群となり、筋弛緩が開始された。自発呼吸なし。

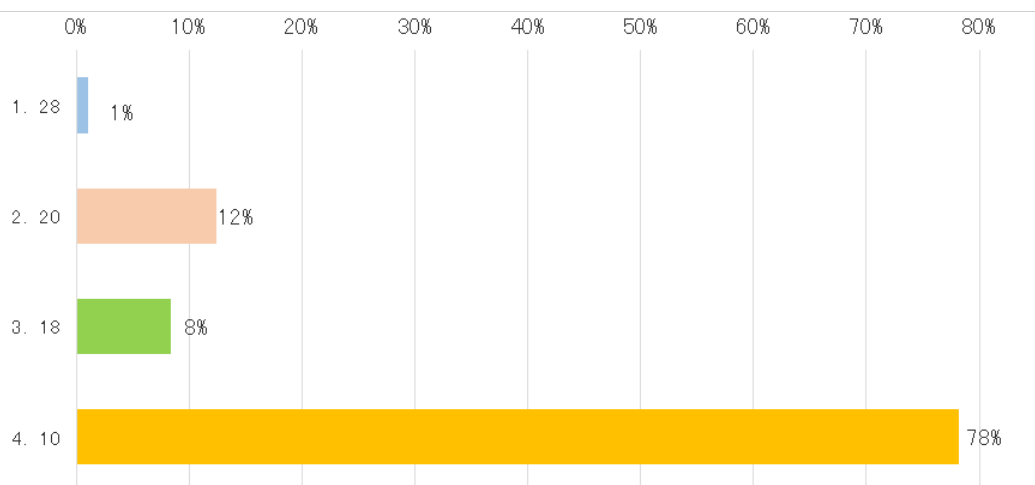
呼吸器設定はAC/PC FiO₂ 1.0, Pi (PC above PEEP) 22cmH₂O, PEEP 8cmH₂O, f 25/min. Ppeak 30cmH₂O, Pplat 28cmH₂O, Vt 220-240mL, SpO₂ 88%. 食道内圧 (Pes) は吸気 20cmH₂O, 呼気 10cmH₂O. なお、経肺圧測定に関わるパラメータは下図のように測定したものとする。



■本症例において計算される Δ TPP(=吸気TPP-呼気TPP)は次のうちどれか？

1. 28
2. 20
3. 18
4. 10

<皆様の解答>



Q2. 解答・解説

正答： 4.

$$\text{吸気 TPP} = P_{\text{plat}} - P_{\text{es}_{\text{end-insp}}} = 28 - 20 = 8 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\text{呼気 TPP} = P_{\text{EEP}} - P_{\text{es}_{\text{end-exp}}} = 8 - 10 = -2 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\Delta \text{ TPP} = \text{吸気 TPP} - \text{呼気 TPP} = 8 - (-2) = 10 \text{ cmH}_2\text{O} \quad (\text{肺を広げるために使用})$$

ちなみに $\Delta P_{\text{es}} = 20 - 10 = 10 \text{ cmH}_2\text{O}$ (胸郭を広げるために使用) となります。

解説：

この症例はすでに高くなってきている吸気圧を見たときにさらなるプラトー圧の上昇を懸念して設定変更を少しためらうケースです。このようなケースで食道内圧を測定すると、

$\text{呼吸器系全体にかかる圧} (\Delta P) = \text{肺を広げる圧} (\Delta \text{ TPP}) + \text{胸郭を広げる圧} (\Delta P_{\text{es}})$
--

となっていることがわかります。

エキスパートオピニオンに基づくものですが、ARDS 患者における肺傷害を防ぐ基準として次のような提案がされています³⁾。

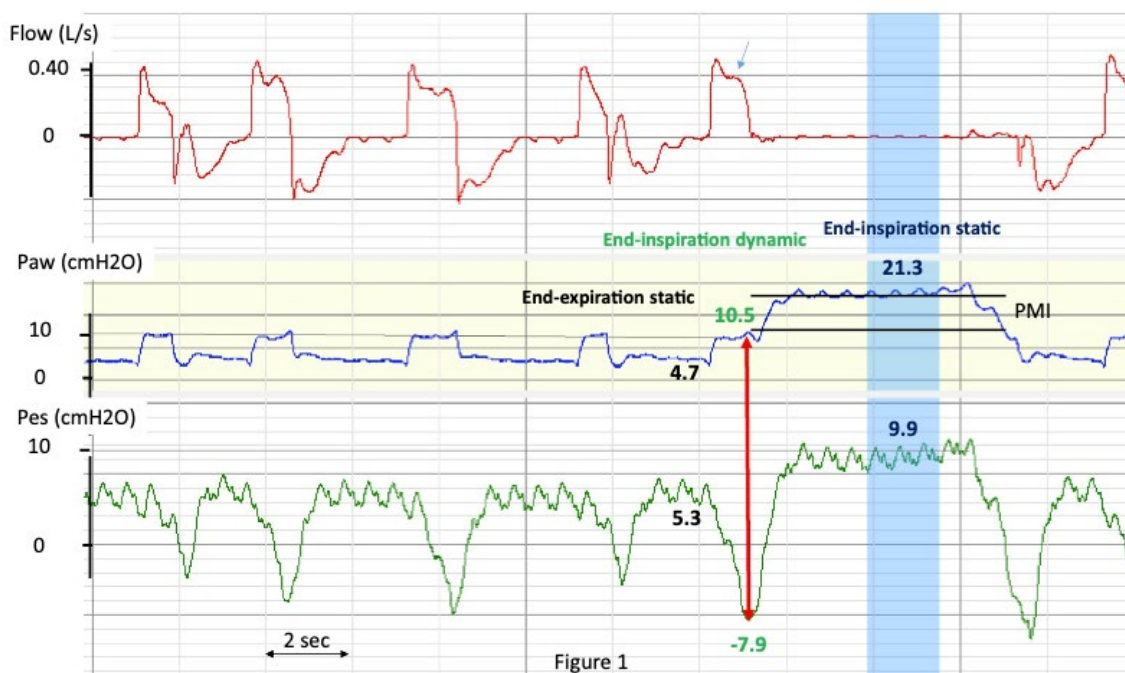
自発呼吸のない患者	$\Delta \text{ TPP} \leq 10 \sim 12 \text{ cmH}_2\text{O}$
	吸気終末 TPP $\leq 20 \sim 25 \text{ cmH}_2\text{O}$
	呼気終末 TPP $> 0 \text{ cmH}_2\text{O}$
自発呼吸のある患者	吸気終末 TPP $\leq 20 \sim 25 \text{ cmH}_2\text{O}$

(文献 3 をもとに作成)

なお、本例のように呼気経肺圧がマイナスとなった場合、肺が呼気時に虚脱している可能性を考え、上記のように呼気終末 TPP $> 0 \text{ cmH}_2\text{O}$ を目指した PEEP 設定が考慮されます。

ただし経肺圧ガイドによる PEEP 設定については EPVent-1 (比較対象: Lower PEEP table ガイド)、さらに対象者を増やした EPVent-2 (比較対象: Higher PEEP table ガイド) という 2 つの RCT があり⁴⁾⁵⁾、EPVent-1 では経肺圧ガイドによる PEEP 設定群で酸素化およびコンプライアンスの改善を認めましたが、EPVent-2 では酸素化改善効果や予後改善効果は認められず、ARDS における PEEP 設定で食道内圧を用いた管理を支持するものではありませんでした。また別の多施設前向き観察研究でも食道内圧測定された 302 名の ARDS 患者について $\Delta \text{ TPP} < 12 \text{ cmH}_2\text{O}$ と吸気終末 TPP $< 24 \text{ cmH}_2\text{O}$ は生存との関連があり、呼気終末 TPP $\geq 0 \text{ cmH}_2\text{O}$ については生存との関連がなかったことが報告されています⁶⁾。しかし肥満患者 (BMI ≥ 30) でのサブグループ解析では呼気終末 TPP $\geq 0 \text{ cmH}_2\text{O}$ と生存に関連を認めたことが報告されています。

ここから少し細かい話になるので読み飛ばしていただいて構いませんが、経肺圧測定のためのパラメータは本例のように短時間(1-2 秒)のポーズを用いてフロー波形がゼロとなる場所で測定します⁷⁾。これは気流が残っていれば厳密には気道内圧≠肺胞内圧となることに基づきます。このようにして測定した経肺圧を静的(static)経肺圧といいます。反面、特に自発呼吸努力のある pressure support ventilation (PSV) などで気道内圧と食道内圧の差が最も大きくなる場所で測定する経肺圧を動的(dynamic)経肺圧といいます⁸⁾。この時の注意点として気道内圧と食道内圧の測定を同じ時相で行うことが挙げられます。



(文献 8 より引用)

例えばここに示す図は PSV で吸気ポーズを行っており、それぞれ下記のように求められます。

呼気終末経肺圧 (static) = $4.7 - 5.3 = -0.6 \text{ cmH}_2\text{O}$

吸気終末経肺圧 (static) = $21.3 - 9.9 = 11.4 \text{ cmH}_2\text{O}$

Δ 経肺圧 (static) = $11.4 - (-0.6) = 12 \text{ cmH}_2\text{O}$

一方で Δ 経肺圧 (dynamic) = $10.5 - (-7.9) = 18.4 \text{ cmH}_2\text{O}$ となります。これは主に吸気努力の指標として用いられ、 $<15\text{-}20 \text{ cm cmH}_2\text{O}$ とすることが提案されています⁹⁾。

Q3.

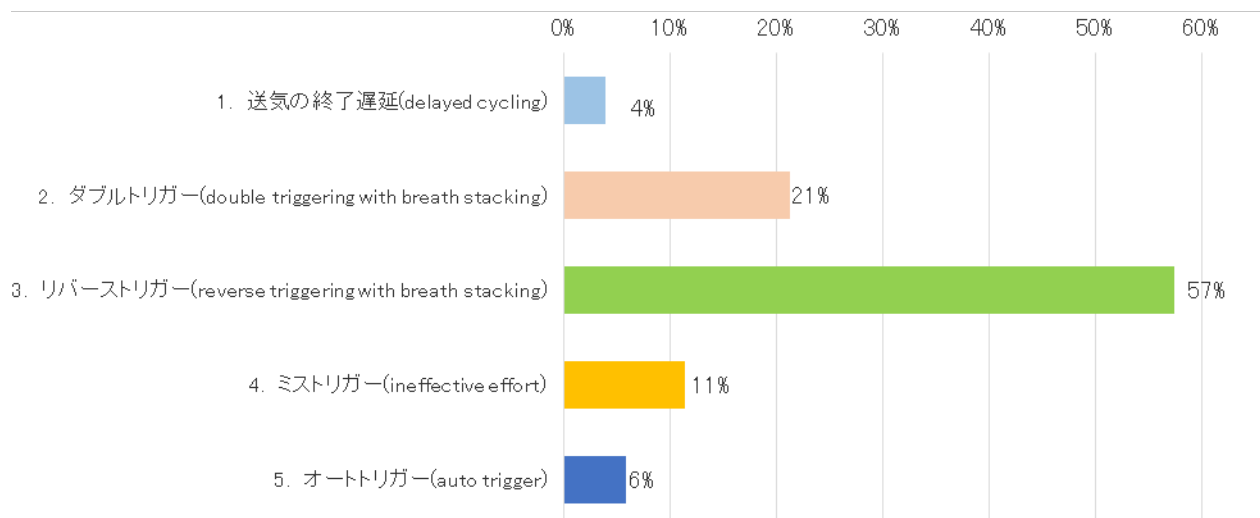
70代男性。COVID-19による急性呼吸不全のため気管挿管・人工呼吸器管理を開始されて2日目。プロポフォール、フェンタニルで鎮静・鎮痛を行なっている。人工呼吸器グラフィック(上段:気道内圧、中段:フロー、下段:食道内圧)で以下の写真のような所見を認めた。



■ここで認められる非同調は以下のうち、どれが最も考えられるか？

1. 送気の終了遅延(delayed cycling)
2. ダブルトリガー(double triggering with breath stacking)
3. リバーストリガー(reverse triggering with breath stacking)
4. ミストリガー(ineffective effort)
5. オートトリガー(auto trigger)

<皆様の解答>



Q3. 解答・解説

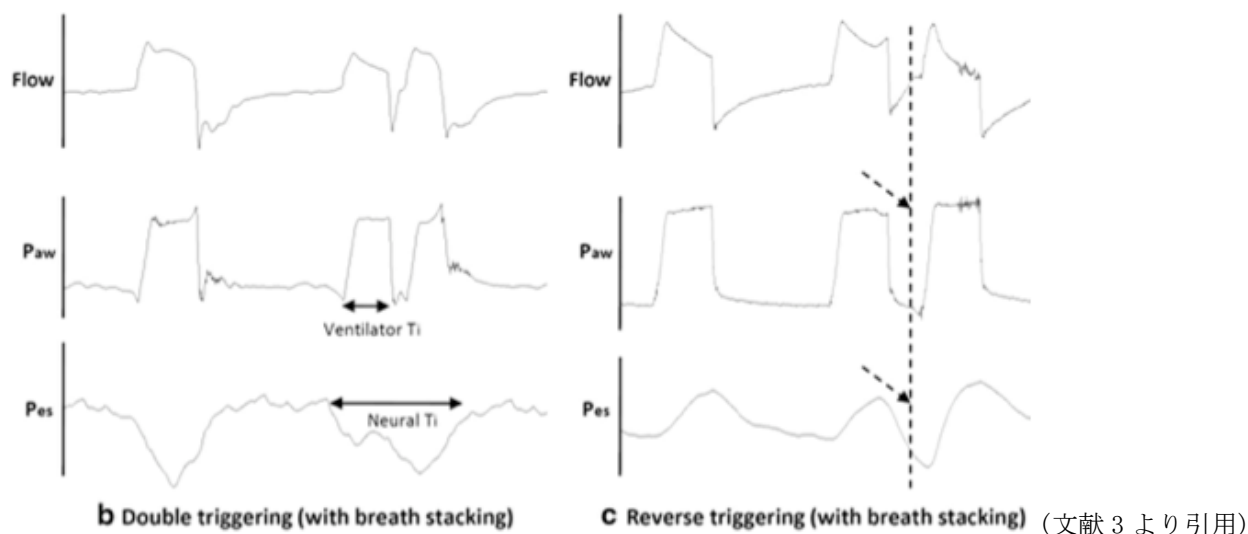
正答： 3.

解説：

上段の気道内圧波形をみると強制換気後に“自発(ピンク色の三角印)”を感知してトリガーしているようにみえます。一方で下段の食道内圧波形をみると下向き(陰圧に大きく振れている)波形を認めます。ここで鑑別に残るのが2.と3.であり、いずれも換気量が制御できずに人工呼吸器関連肺傷害をきたす可能性があります。

一般にダブルトリガーは患者の要求する吸気時間に対して、人工呼吸器で設定された送気時間が短すぎる場合、もしくは患者の要求する1回換気量に対して人工呼吸器から供給される1回換気量が少なすぎる場合に生じます。リバーストリガーは通常、深鎮静にある患者で強制換気によって生じた横隔膜の収縮が強制換気後にトリガーされてしまうことで生じると考えられています^{3) 10)}。

本例で注目したいのは食道内圧波形が陰圧になる時相です。下図に示すようにダブルトリガーとリバーストリガーでは食道内圧が陰圧になり始めるタイミングが異なります。



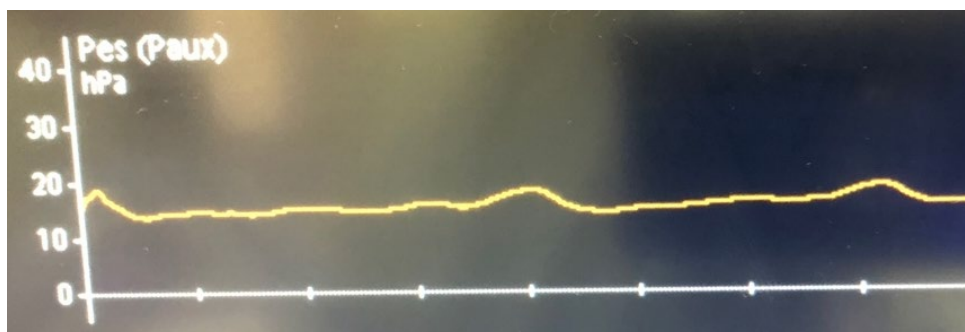
食道内圧を測定していない患者で行なっているように、気道内圧、フロー、そして呼吸様式の観察だけでも実際はこの2つを鑑別できることも多いですが、食道内圧波形があればさらに鑑別は容易となります。

なお、リバーストリガーへの対処として鎮静を浅くしてPSVへ変更するか強制換気の換気回数を減らす、もしくは1回換気量の制限が必要であれば筋弛緩の使用を考慮します。人工呼吸器のトリガー閾値をあげる(トリガーされにくくすること)ことで気道内圧波形は一見、非同調が改善するようですが、食道内圧波形をみるとリバーストリガーは残るとされます¹⁰⁾。本例においても下の写真のようにその現象が認められました(よくみると気道内圧波形も他の強制換気の時と微妙な違いがあることがわかるかと思います)。



Q4.

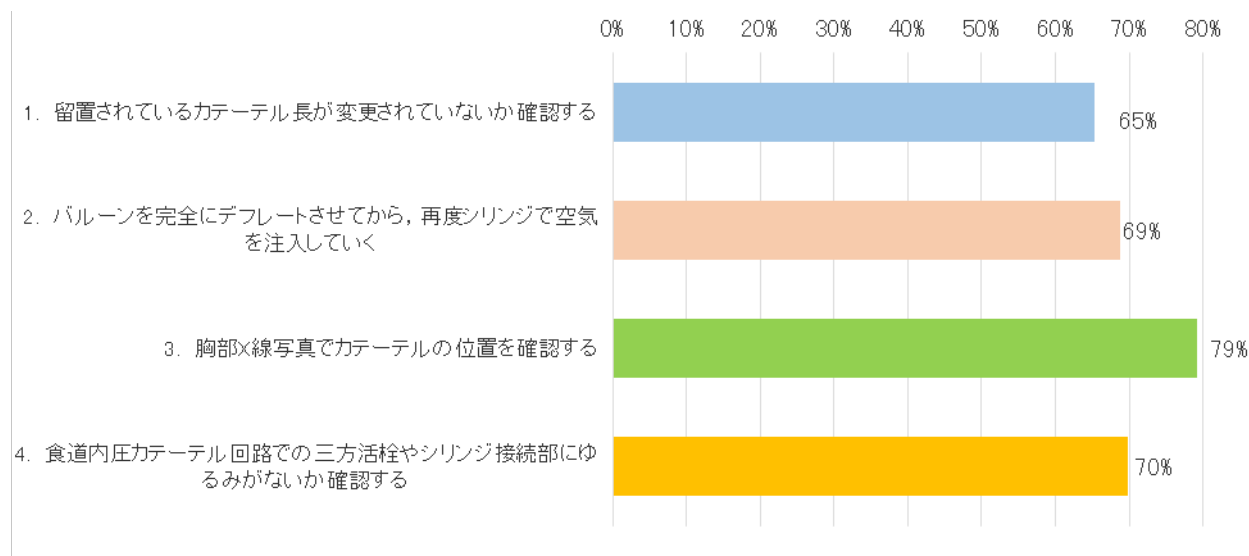
人工呼吸器管理を受けている ARDS 患者の人工呼吸器グラフィックを確認したところ、食道内圧波形が以下の写真のような所見であった。



■食道内圧をもとにした経肺圧評価を行うにあたり、適切なカテーテルの調整方法は以下のどれか？
(複数回答)

1. 留置されているカテーテル長が変更されていないか確認する。
2. バルーンを完全にデフレートさせてから、再度シリンジで空気を注入していく。
3. 胸部 X 線写真でカテーテルの位置を確認する。
4. 食道内圧カテーテル回路での三方活栓やシリンジ接続部にゆるみがないか確認する。

<皆様の解答>

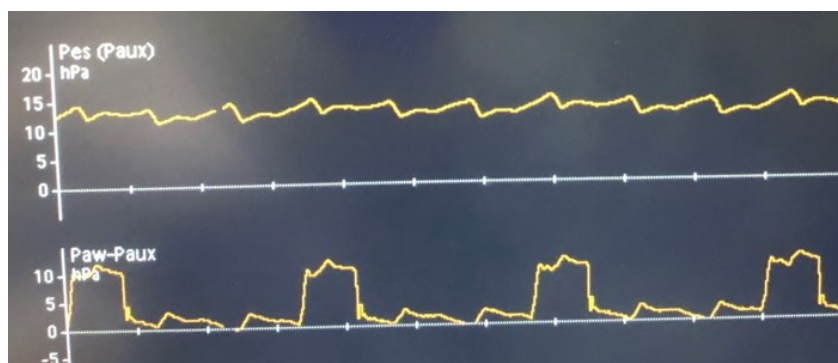


Q4. 解答・解説

正答：すべて

解説：

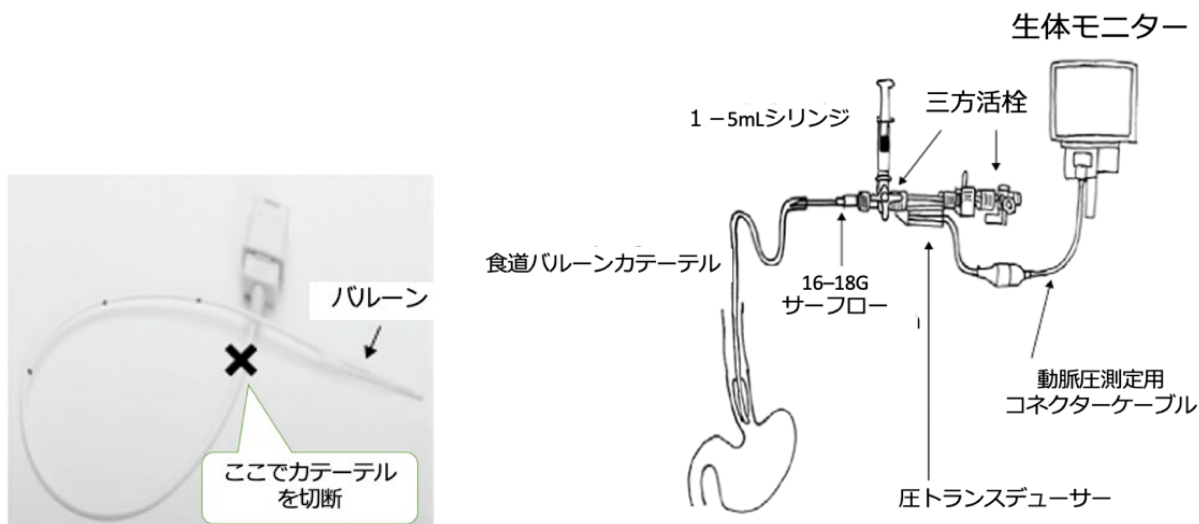
食道バルーンカテーテルの位置調整に関する問いです。問いの写真では cardiac oscillation (心臓のアーチファクト) が認められていません。通常は下の写真のように心拍に応じて波打つように出現するアーチファクトが認められるのが正しい波形です。これは食道内圧を測定するバルーンが食道下部 1/3、すなわち心臓の背側に位置しており、腹腔レベルではなく胸腔レベルにあることを意味しています。



本例ではすでに留置されている食道バルーンカテーテルの位置調整について問うていますが、カテーテルの種類および挿入も含めて述べます。

胃管一体型の食道バルーンカテーテルのうち、本邦で使用可能なものは Smart Cath G® と NutriVent™ 食道内圧バルーンキットの 2 種類が存在します。測定した食道内圧をグラフィック表示で

きる人工呼吸器は AVEA (IMI, Carefusion) と Hamilton G5, Hamilton C6(ともにハミルトンメディカル)があります。しかし、これらの人工呼吸器がなくとも、動脈圧測定で用いるトランスデューサー、圧ラインを用いることで生体モニターに表示することも可能です(その際、 $1\text{mmHg}=1.36\text{cmH}_2\text{O}$ の換算が必要となります)。



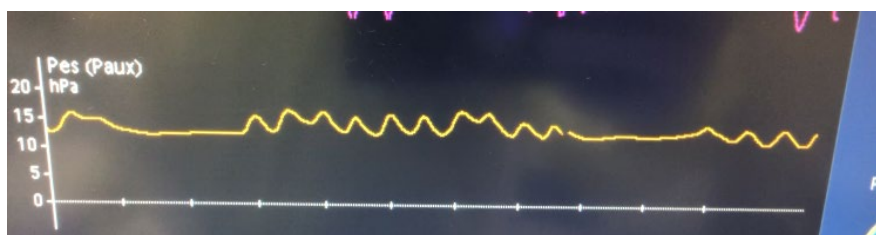
(文献 11 をもとに作成)



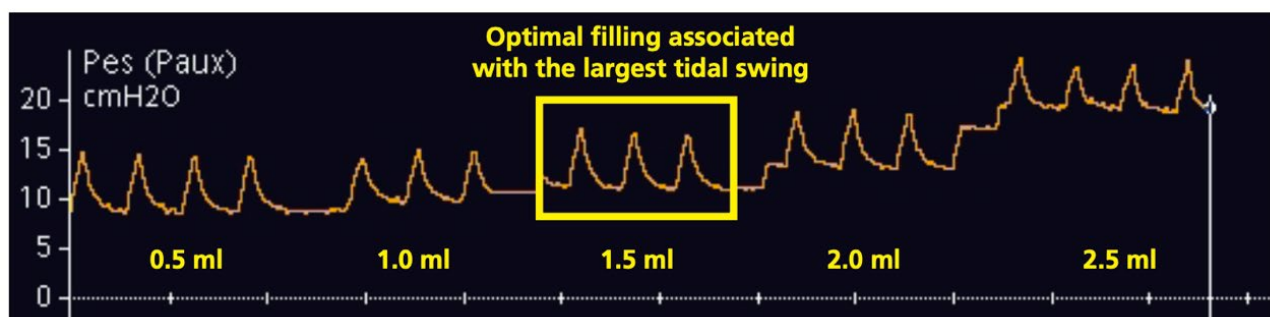
切断したカテーテルとサーフローの接続部

(漏れやすいのでフィルム材を用いてシールすることが多い)

バルーンのリークがないことを確認したら通常の胃管と同じように経鼻もしくは経口で胃内まで挿入し、圧ラインに接続して生体モニターもしくは人工呼吸器に食道内圧波形を表示します。最小のメーカーの推奨容量でバルーンを拡張させたら、腹壁を愛護的に何度か用手圧迫することで食道内圧が正に振れることを確認します。



ゆっくりカテーテルを引き抜いていき、先述の cardiac oscillation が出現することを確認します。さらにバルーン的位置調整が適切か確認する方法として呼気ホールドを用いた動的閉塞テストがあります。呼気ホールドを開始して、自発呼吸がある場合には自発呼吸努力中の気道内圧と食道内圧の陰性波を比較し、自発呼吸がない場合には胸郭を圧迫して気道内圧と食道内圧の陽性波を比較します。これは呼気ホールド中に肺の容量を一定に保つことで経肺圧(=気道内圧-食道内圧)も一定となるため、テスト中の気道内圧の変化(ΔP_{aw})および食道内圧の変化(ΔP_{es})は一致することを利用して、 $\Delta P_{es}/\Delta P_{aw}$ が 1.0 ± 0.2 であればバルーン的位置は適切とされます¹²⁾。しかし、実際にこのテストを行うと患者の不快感がかなり強いことを実感し、肺保護を考慮するようなケースで何度も繰り返すことは現実的ではないかも知れません。そのため、胸部 X 線写真でバルーン的位置を確認して問題なければ、一定の 1 回換気量での換気中に食道内圧波形の最大スウィングが得られる最小のバルーン充填量を採用しています。



(文献 13 より引用)

食道バルーンカテーテルの挿入と位置調整については Hamilton Medical 社による教育動画 (<https://www.youtube.com/watch?v=wivDv9faHrM>) もご参照ください。

通常の胃管合併症のほか、潰瘍形成などにも注意が必要で、基本的に測定後は毎回バルーンをデフレートしています。そのため、問いのように測定毎に調整が必要となります。ルーティンとしては直近の胸部 X 線写真でのバルーン位置と顔面の固定位置が変わっていないことを確認した後に、測定回路内の三方活栓やシリンジにゆるみがないことを確認し、適切なバルーン量を滴定しています。

...

ここまで食道内圧測定による利点を中心に解説しました。紙面の都合上、詳細を省きましたが、食道内圧は腹側の胸膜圧を正確に反映しない可能性¹⁴⁾や、傷害肺における強い自発呼吸の存在下では胸膜圧を過小評価し得ること¹⁵⁾、バルーン自体のエラスタンスや食道エラスタンスなどによる食道バルーン内圧の絶対値への影響¹⁶⁾も指摘されています。他の検査でも同様ですが、単一の所見のみにとらわれず、身体所見(例:視診での呼吸様式)やその他の検査所見(例:P-V tool, EIT:Electrical impedance tomography)も参考にして判断することが大切であると言えます。

【まとめ】

食道内圧測定を行うことで

- ① 自発呼吸成分を分析できる
- ② 呼吸器系全体にかかる圧が実際に肺にどれくらいかかるかわかる
- ③ PEEP を設定する指標にできるかも知れない
- ④ 患者－呼吸器間の非同調を検出しやすくなる

といったことが可能となり、適切な人工呼吸器設定を行う手がかりとなり得ます。

【引用文献】

- 1) Bellani G, et al. Epidemiology, patterns of care, and mortality for patients with acute respiratory distress syndrome in Intensive Care Units in 50 countries. JAMA. 2016;315:788-800.
- 2) Slutsky AS, Ranieri VM. Ventilator-induced lung injury. N Engl J Med. 2013 Nov 28;369(22):2126-36.
- 3) Mauri T, et al. Esophageal and transpulmonary pressure in the clinical setting: meaning, usefulness and perspectives. Intensive Care Med. 2016 Sep;42(9):1360-73.
- 4) Talmor D, et al. Mechanical ventilation guided by esophageal pressure in acute lung injury. N Engl J Med. 2008 Nov 13;359(20):2095-104.
- 5) Beitler JR, et al. Effect of Titrating Positive End-Expiratory Pressure (PEEP) With an Esophageal Pressure-Guided Strategy vs an Empirical High PEEP-Fio2 Strategy on Death and Days Free From Mechanical Ventilation Among Patients With Acute Respiratory Distress Syndrome: A Randomized Clinical Trial. JAMA. 2019 Mar 5;321(9):846-857.
- 6) Chen L, et al. Partition of respiratory mechanics in patients with acute respiratory distress syndrome and association with outcome: a multicentre clinical study. Intensive Care Med. 2022 Jul;48(7):888-898.
- 7) Grieco DL, et al. Transpulmonary pressure: importance and limits. Ann Transl Med. 2017 Jul;5(14):285.
- 8) Mezidi M, et al. Complete assessment of respiratory mechanics during pressure support ventilation. Intensive Care Med. 2019 Apr;45(4):557-558.
- 9) Goligher EC, et al. Clinical strategies for implementing lung and diaphragm-protective ventilation: avoiding insufficient and excessive effort. Intensive Care Med. 2020 Dec;46(12):2314-2326.
- 10) Murray B, et al. Reverse Triggering: An Introduction to Diagnosis, Management, and Pharmacologic Implications. Front Pharmacol. 2022 Jun 22;13:879011.
- 11) 寺田雄紀ら. 先天性角化不全症乳児のサイトメガロウイルス肺炎に対して肺保護換気を行った

- 1 例. 人工呼吸. 2017 ; 34 : 66-71.
- 12) Akoumianaki E, et al. The application of esophageal pressure measurement in patients with respiratory failure. *Am J Respir Crit Care Med.* 2014 Mar 1;189(5):520-31.
- 13) Hamilton Medical 社 Advanced procedure esophageal balloon catheter reference card (<https://www.hamilton-medical.com/ja/Products/Technologies/Transpulmonary-Pressure.html>)
- 14) Bastia L, et al. Role of Positive End-Expiratory Pressure and Regional Transpulmonary Pressure in Asymmetrical Lung Injury. *Am J Respir Crit Care Med.* 2021 Apr 15;203(8):969-976.
- 15) Yoshida T, et al. Fifty Years of Research in ARDS. Spontaneous Breathing during Mechanical Ventilation. Risks, Mechanisms, and Management. *Am J Respir Crit Care Med.* 2017 Apr 15;195(8):985-992.
- 16) Hedenstierna G. Esophageal pressure: benefit and limitations. *Minerva Anesthesiol.* 2012 Aug;78(8):959-66.