

症例  
ライブラリー

## 波形を読む

気腹を開始したら  
最高気道内圧が急激に上昇

## ■症 例

45歳の女性。身長152 cm、体重91 kg (BMI 39.3)。術前合併症に喘息があり、1秒率 (FEV<sub>1.0%</sub>) 65%である。子宮体癌に対してロボット支援下子宮全摘、付属器切除術が予定された。気管チューブは内径7.0 mm、20 cm 固定にしてカフ圧計で25 cmH<sub>2</sub>Oになるようにカフを膨らませた。人工呼吸器は、従量式換気 (VCV)、1回換気量400 mL、呼吸終末陽圧 (PEEP) なし、吸入酸素濃度 (FIO<sub>2</sub>) 30%、I:E 比1:2、呼吸数12回/minで開始したところ、最高気道内圧23 cmH<sub>2</sub>Oで呼吸終末二酸化炭素分圧 (P<sub>ET</sub>CO<sub>2</sub>) は44 mmHgであった。無気肺による肺動脈虚脱のため徐々に経皮的末梢動脈血酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>) が低下し、手術開始前には94%となったため、リクルートメントを行った後、PEEP 8 cmH<sub>2</sub>Oを付加した。手術が開始され頭低位にして気腹を開始すると最高気道内圧アラームが鳴動し、値を確認すると40 cmH<sub>2</sub>Oであった。

アキ  
さて、あなたならどうする？

## 鑑別のプロセス

高度肥満患者に対して頭低位でのロボット支援下手術施行中に遭遇したトラブル症例である。気腹および頭低位という状況下で発生した気道内圧上昇であり、麻酔器 (人工呼吸器)、回路・気管チューブ、患者自身のどこに問題があるのかを探る必要がある。人工呼吸管理中の気道トラブルを迅速に評価するためのフレームワーク「DOPE」が活用できる。

- ① D (Displacement) : チューブ位置異常、気管支挿管  
② O (Obstruction) : 麻酔回路や気管チューブの屈曲・閉塞、気道分泌物など  
③ P (Pneumothorax) : 気胸  
④ E (Equipment failure) : 麻酔器の問題

加えて本症例では患者因子として、⑤喘息発作、⑥無気肺も考慮すべきである。

## ■① D (Displacement) : チューブ位置異常

高度肥満患者では、体位変換や唾液などの分泌物によるチューブ固定テープのゆるみにより、気管チューブが容易に深くなり気管支挿管となることがある。

## ■② O (Obstruction) : 気道閉塞・回路や気管チューブの閉塞

体位変換に伴う気管内分泌物などの移動による気道の狭窄や閉塞、また気管チューブや回路の屈曲や狭窄をしていないか確認する。VCVにおいては、気道内圧のピーク圧とプラトー圧の差が開大する。

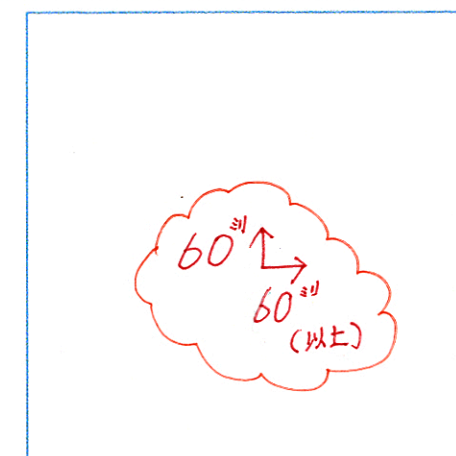
## ■③ P (Pneumothorax) : 気胸

気腹と頭低位によって腹腔内臓器が横隔膜を圧迫し、肺コンプライアンスが著明に低下している。VCVは、設定した1回換気量を維持するために気道内圧が上昇する。これにより肺の圧損傷から気胸を生じるリスクが高まる。気胸を疑った場合は、聴診により呼吸音の左右差、また、肺エコーでsliding signの有無を確認する。頭低位の場合は漏れた空気が肺底部側にたまりやすいので、プローブ位置を調整して横隔膜直上まで確認する。

## ■④ E (Equipment failure) : 麻酔器の問題

用手換気に切り替え換気可能か確認する。すぐに準備ができるのであればJackson-Rees回路やバグバルブマスクなど、麻酔器とは別の器具で換気する。換気可能で胸部も上がり換気量も維持できるのであれば、麻酔器側のトラブル (呼吸弁不良や換気設定が不適切) の可能性がある<sup>1)</sup>。

図1  
喘息発作時の  
気道内圧波形と流量波形  
吸気開始時に基線に戻っていないのが  
特徴である。



## ■⑤喘息発作 (図1, 図B②)

喘息の既往がある場合は特に注意が必要である。喘息発作時、気道内圧波形は気道抵抗が高くなっているため、吸気呼気ともに気道内圧が上昇する。流量波形は、呼吸障害に伴う呼吸時間の延長のため、呼吸終了時に呼吸流量が0に戻らず次の吸気が始まる。カプノグラム波形は、第III相が右肩上がりになる。

## ■⑥無気肺

肥満患者では、胸部や腹腔内に脂肪が蓄積することで圧力が上昇し、横隔膜の可動域が制限され、その結果、機能的残気量 (FRC) が減少する。また、胸壁と肺の柔軟性が低下することで、無気肺を形成しやすい状態になる。本症例のように気腹圧、頭低位によりさらに横隔膜が挙上され、肺が圧迫され虚脱、無気肺が形成される。

## ■その後の経過

ただちに用手換気に切り替え、バッグはやや重いものの換気が可能であることを確認した。チューブの屈曲や位置異常は目視で認めず、聴診では両側の呼吸音が減弱するも左右差なく、喘鳴も聴取されなかった。呼吸流量波形では呼吸が基線まで戻っていることを確認した。肺エコーを実施し、両側胸膜にsliding signを認めたことから、気胸の可能性は否定的と判断した。その後、VCVに再設定し圧波形を確認したところ、ピーク圧39 cmH<sub>2</sub>O、プラトー圧32 cmH<sub>2</sub>Oであった。

主な原因は無気肺・コンプライアンスの低下と考え、再度リクルートメント後PEEPを14 cmH<sub>2</sub>Oに設定し、その後は循環動態に悪化はみられなかった。理想体重は45 kgと算出されるため、1回換気量を7 mL/kgに相当する320 mLに設定し直したところ、ピーク圧33 cmH<sub>2</sub>O、プラトー圧が28~29 cmH<sub>2</sub>O前後で換気維持できており、P<sub>ET</sub>CO<sub>2</sub>の上昇も認めなかったため手術を再開した。

ロールアウト後、頭低位を解除し、PEEPを8 cmH<sub>2</sub>Oに戻した。閉創をもって手術を終了し、麻酔覚醒前にβ<sub>2</sub>刺激薬の吸入およびリクルートメントを行い、頭高位としたうえで覚醒を確認し抜管、その後麻酔後回復室 (PACU) へ移送し呼吸状態を継続的にフォローした。

## 解説

## ■VCVにおけるピーク圧とプラトー圧の評価ポイント (図2)

◎ピーク圧 (Ppeak) 吸気中に到達する最高圧。気道抵抗+肺・胸部コンプライアンスの合計圧。

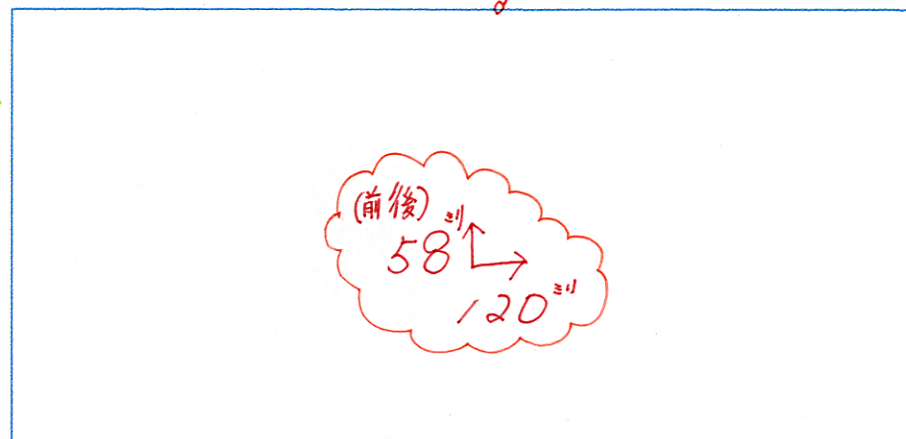
藤吉 佑樹  
FUJIYOSHI, Yuki

廣田 誠二  
HIROTA, Seiji

高知大学医学部  
麻酔科学・  
集中治療医学講座



色ベタ  
図2  
気道内圧波形:  
ピーク圧とプラトー圧から  
わかること  
(文献2より, 改変)



●**プラトー圧 (Pplat)** 吸気終了後に空気の流れを一時停止させた際の肺胞内圧。肺および胸郭のコンプライアンスに関連する圧のみを反映。

●**評価のポイント** ピーク圧とプラトー圧の差は、気道抵抗を反映する。この差は通常は5 cmH<sub>2</sub>O 以下だが、差が10 cmH<sub>2</sub>O 以上の場合、気道抵抗の増加を示す。原因としては気管チューブの狭窄や気道分泌物、気管支攣縮などがある。一方、プラトー圧の上昇は、肺または胸郭のコンプライアンス低下を示し、肺炎、肺水腫、急性呼吸促迫症候群 (ARDS)、肥満などが原因となる<sup>2)</sup>。また、吸気流速が速すぎると、ピーク圧が高くなるため、流速を下げて再確認することも重要である。

■ **driving pressure (DP) とは**

VCV の場合、「DP = Pplat - PEEP」で定義され、DP が15 cmH<sub>2</sub>O を超えると人工呼吸器関連肺損傷 ventilator-induced lung injury (VILI) のリスクが高まる<sup>3)</sup>。従圧式換気 (PCV) では、吸気圧が DP と誤認されることがある。吸気圧には気道抵抗を克服する圧も含まれるため、実際には、吸気圧  $\geq$  DP となる。そのため正確な DP の評価には、VCV と同様に吸気ポーズを行い、プラトー圧の測定が必要である。

また、通常は必須ではないが、auto-PEEP (内因性 PEEP) が疑われる場合や、より正確に呼気終末の肺胞圧を測定したい場合は、呼気ポーズを行うことで正確な PEEP 値が測定できる。しかし、ポーズ機能が搭載されていない麻酔器もある点に注意が必要である。

■ **ロボット手術における呼吸管理上の課題**

本症例のような、ロボット支援下での子宮体癌や前立腺の手術では、約25°程度の頭低位が必要となることが多い。頭低位ではFRCが約20%減少するとされているが、肥満患者ではさらに顕著となり、肺コンプライアンスが低下しプラトー圧の上昇を引き起こす<sup>4,5)</sup>。頭低位の角度に関しては、非肥満患者では25°未満でも腹腔内臓器が頭側へ移動し、良好な術野が得られることが多い。一方、BMI 35以上の高度肥満患者では、25°あるいはそれ以上の傾斜角度が必要となる場合がある。人工呼吸管理においては、1回換気量4~8 mL/kg、プラトー圧30 cmH<sub>2</sub>O 以下を目安とする。しかし、肥満患者ではそれを超えることも少なくない。このような場合には、食道内圧を用いた経肺圧評価が有用とされる。呼気終末において経肺圧がわずかに陽圧となるよう PEEP を調整することで、肺虚脱の回避が期待できる。頭低位によって気道内圧が上昇しても、経肺圧自体はさほど変化しないことがあり、この点を理解することで一定の気道内圧上昇を許容できるケースもある。近年では、こうした力学評価を可視化するモニタリング技術も導入されており、安全な呼吸管理に貢献している<sup>6)</sup>。

コラム ◆ カブノグラム波形の読み方

カブノグラム波形は横軸に時間、縦軸に二酸化炭素分圧を示す波形であり、呼吸および循環の状態を把握するための重要な指標である。波形はI相からIV相に分けられている(図A)。

・第I相：呼気初期に排出される解剖学的死腔ガスで、CO<sub>2</sub>を含まず基線を保つ。

・第II相：肺胞ガスと死腔ガスが混じり始めCO<sub>2</sub>濃度が上昇する。

・第III相：主に肺胞由来のガスが排出され、波形が平坦またはゆるやかに右上がりになる。呼気終了時の値が P<sub>ET</sub>CO<sub>2</sub> となる。

・第IV相：吸気が始まり、CO<sub>2</sub>濃度が急激に低下し波形は基線に戻る。

P<sub>ET</sub>CO<sub>2</sub>は動脈血二酸化炭素分圧 (PaCO<sub>2</sub>) より2~5 mmHg 低くなる。これは死腔ガスが混じるためであるが、肺血流の低下や換気血流比の不均衡があると両者の差が大きくなるため注意が必要である。カブノグラムの変化は、呼吸および循環状態の変化を早期に察知するのに有用である。

代表的な異常波形として、以下のようなパターンがある(図B)。

①再呼吸(図B①)：吸気時にもCO<sub>2</sub>を含むため、波形の基線が上昇する。二酸化炭素吸収剤の劣化や吸気弁の故障が原因のことが多い。

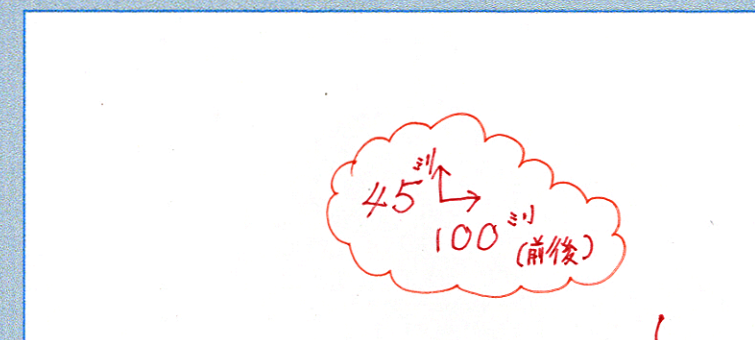
②閉塞性換気障害(図B②)：肺胞間で換気血流比 (V/Q) の不均一性が生じることで、第III相が右上がりになる。喘息発作、呼吸回路や気管チューブの狭窄などでみられる。

③肺塞栓や心拍出量の急減(図B③)：P<sub>ET</sub>CO<sub>2</sub>が急激に低下する。肺血流量の急激な減少を示すため迅速な対応が必要である。

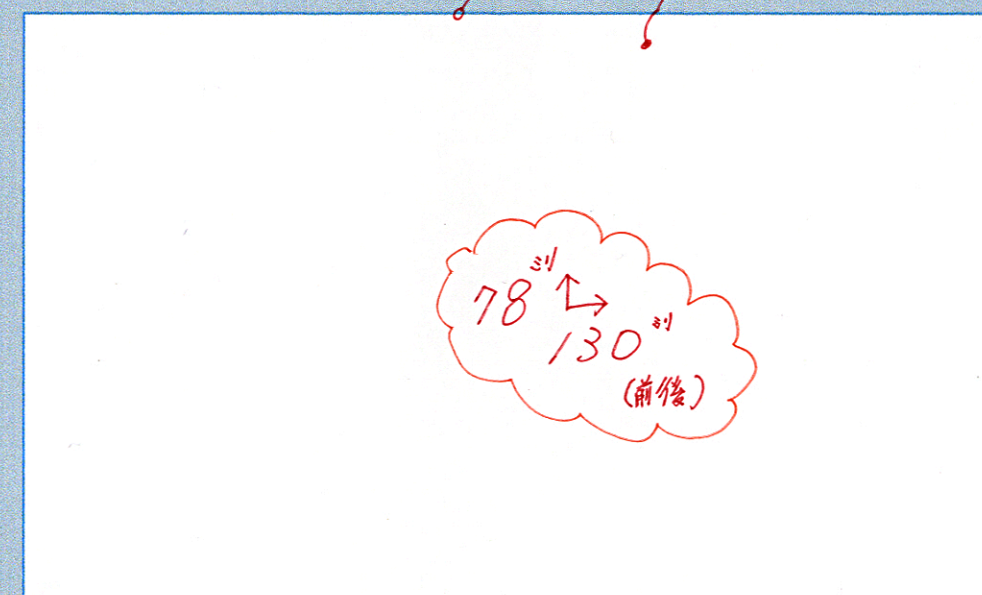
④エアリーク(図B④)：波形の基線が不安定または低下する。これは呼気中に外部から空気が混入し、CO<sub>2</sub>濃度が低下することで波形全体が平坦化または不安定化するためである。接続部のゆるみやチューブカフの不良など、回路からの空気漏れが原因となる。

⑤ tall up sign(図B⑤)：第III相終末部が急に上昇する。これはサイドストリーム型カブノメータにおいて、サンプリングチューブが損傷している場合にみられ、接続不良や空気の混入が原因となる<sup>7)</sup>。

29  
w  
誌



図A  
カブノグラムの  
基本波形  
呼気の終末が  
P<sub>ET</sub>CO<sub>2</sub>になる。



図B  
異常な  
カブノグラム波形  
①再呼吸  
②閉塞性換気障害  
③肺塞栓、急激な循環不全  
④エアリーク  
⑤サンプリングチューブ  
破損



## キーワード

肥満患者の呼吸管理

VCV 波形解析

DOPE

頭低位

## ■ ■ ■ まとめ

- 肥満患者におけるロボット手術では、頭低位と気腹により肺の虚脱やコンプライアンス低下を引き起こしやすい。
- 気道内圧上昇など人工呼吸管理中のトラブル発生時には、DOPE による鑑別と波形解析が早期対応に有効である。
- ピーク圧・プラトー圧、カプノグラム波形の理解が病態評価と適切な対応の鍵となる。

## ■ さらなる学習のために

● 文献 5 は、重症患者の術中呼吸管理における個別化された肺保護換気戦略の重要性を解説した一編。最新のエビデンスと先進的モニタリング手法を踏まえており、術中の呼吸管理をアップデートしたい麻酔科医・集中治療医にはぜひ参照してほしい。

## ■ 文 献

1. 江花英朗．気腹開始後の急激な気道内圧上昇．LISA 2024；31：730-3.
2. 中沢弘一．麻酔と気道確保 ③麻酔中の換気状態の評価．日臨麻会誌 2014；34：464-71.
3. Amato MB, Meade MO, Slutsky AS, et al. Driving pressure and survival in the acute respiratory distress syndrome. N Engl J Med 2015；372：747-55.
4. 山口 剛，白石としえ，関 洋介．肥満患者の術後管理：生理的变化と合併疾患，アウトカム，術後管理のポイントとその実際．Intensivist 2012；4：365-77.
5. Lamvu G, Zolnoun D, Boggess J, et al. Obesity：physiologic changes and challenges during laparoscopy. Am J Obstet Gynecol 2004；191：669-74.
6. Hennessey E, Bittner E, White P, et al. Intraoperative ventilator management of the critically ill patient. Anesthesiol Clin 2023；41：121-40.
7. Capnography.com. Dual waveform capnogram. (<https://www.capnography.com/dual-waveform-capnogram/>) (2025 年 4 月 13 日閲覧)

37 1/2 A.4.