



GE HealthCare

グラフィックモニターによる 全身麻酔中の人工呼吸モニタリング

横浜市立大学附属病院麻酔科 長嶺 祐介 先生



はじめに

呼吸を評価するためのモニタリングの方法には様々なものがあるが、我々麻酔科医は、周術期や急性期の呼吸管理の専門家として、それらに習熟することは重要である。全身麻酔の人工呼吸中においても、呼吸モニタリングを適切に評価し、対処することが常に求められる。GE HealthCare Aisys, Avance, Carestation 600シリーズ, Carestation 750シリーズ麻酔器で、集中治療用の高性能人工呼吸器と同様に、種々のグラフィックモニターを表示できることが、大きな特徴のひとつである。圧容量曲線、流量容量曲線、流量波形などのグラフィックモニターからは、呼吸生理学的に重要な情報を読み取ることができる。その情報をもとにして、患者の病態を把握し、術中や術後の呼吸管理に役立てることで、より優れた周術期管理につながる事が期待される。本稿では、人工呼吸管理における呼吸モニタリング法のうち、特にグラフィックモニターの読み方や、それに対応する臨床活用法について、基本的事項を中心に解説する。

1 呼吸モニタリング

日本麻酔科学会が提唱している『安全な麻酔のためのモニター指針』の中で、呼吸に関連する記述を抜粋した(図1)。酸素化と換気について、身体所見に加えて、パルスオキシメータ、カブノメータ、換気量モニターなどを用いることとされている。

身体診察による人工呼吸モニタリングとして、人工呼吸中の身体診察項目を記した(図2)。視診・聴診・触診それぞれに対するの評価項目を記載した。

器械による人工呼吸モニタリングとして、呼吸の要素(気道・酸素化・換気・酸素消費)と、それに対応する器械を記載した(図3)。特にカブノメトリーは、本稿では詳細は割愛するが、気管挿管の確認、換気状態の確認、肺血流量モニターとして非常に有用である。

- ① 現場に麻酔を担当する医師が居て、絶え間なく看視すること。
- ② 酸素化のチェックについて
 - ▶ **皮膚、粘膜、血液の色**などを看視すること。
 - ▶ **パルスオキシメータ**を装着すること。
- ③ 換気のチェックについて
 - ▶ **胸郭や呼吸バッグの動き及び呼吸音**を監視すること。
 - ▶ 全身麻酔では**カブノメータ**を装着すること。
 - ▶ **換気量モニター**を適宜使用することが望ましい。

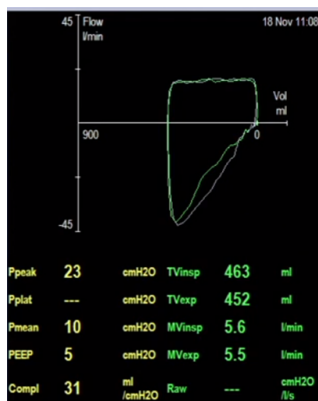
図1

身体診察	評価項目
視 診	胸郭上昇の左右差、チアノーゼ有無、呼吸バッグの状態、呼吸数
聴 診	呼吸音の左右差、異常呼吸音、食道挿管の否定
触 診	胸郭上昇、皮下気腫の有無

図2

呼吸の要素	代表的な評価
気 道	カブノメトリー
酸素化	パルスオキシメータ、血液ガス分析
換 気	カブノメトリー、血液ガス分析、人工呼吸器グラフィックモニタリング
酸素消費・運搬	混合静脈血/中心静脈酸素飽和度

図3

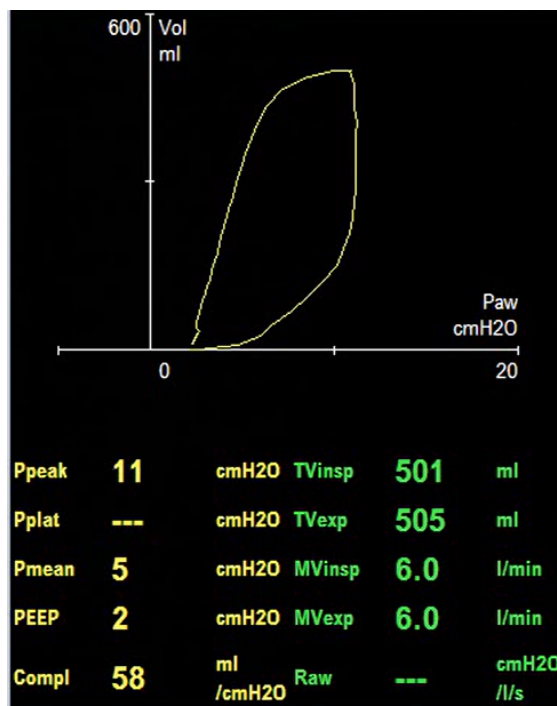
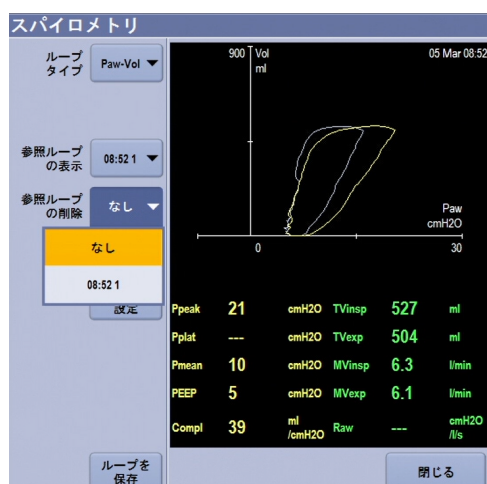


2 人工呼吸器によるグラフィックモニタリング

グラフィックモニタリングには、患者の呼吸生理学的情報が隠れている。そのため、患者の病態生理を読み取ることができれば、術中・術後の呼吸管理に応用することができる。このように有用なグラフィックモニタリングであるが、まずは波形に慣れることが先決で、モニタリングに表示される数値にはあまりこだわらずに、同一患者の経時変化に注目することが第一歩だと考える。

人工呼吸器のグラフィックモニタリングには、経時曲線とループ曲線の2種類がある(図4)。経時曲線は、横軸が時間経過を示していて、縦軸に気道内圧・換気量・流量に設定することができる。ループ曲線は1回の呼吸周期を示している。今回は、流量－換気量曲線(F-Vカーブ)、気道内圧－換気量曲線(P-Vカーブ)を取り上げる。

グラフィックモニタリングを理解する上で、気道抵抗とコンプライアンスの概念について、簡単な理解が必要となる。気道抵抗とコンプライアンスの理解には、『ストロー』と『風船』をイメージするとわかりやすい(図5)。ストローに相当するのが、気道であり、風船に相当するのが肺胞である。気道内を流量Fが通過する際に、重要な関連を持つのが気道抵抗Rであり、肺胞内を圧力Paで容積Vに膨らませる際に関連するのがコンプライアンスCである。代表的な疾患として、気道抵抗の上昇するタイプと、コンプライアンスが低下するタイプに分類することができる。



経時曲線：横軸が時間経過

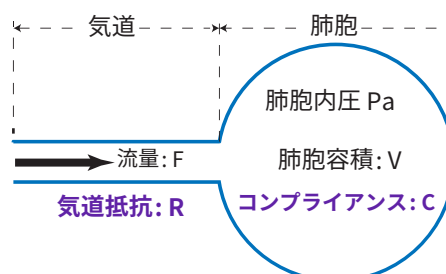
- 気道内圧
- 換気量
- 流量

ループ曲線：1回の呼吸周期

- 流量－換気量曲線(F-Vカーブ)
- 気道内圧－換気量曲線(P-Vカーブ)

図4

気道抵抗とコンプライアンス
→『ストロー』と『風船』モデルで考える



代表的な疾患

気道抵抗の上昇：気管支喘息、COPD、分泌物貯留

コンプライアンス低下：無気肺、ARDS、(胸水・胸郭異常)

図5



3 気道内圧経時曲線

量規定換気(VCV)と圧規定換気(PCV)の気道内圧経時曲線を示す(図6、図7)。各波形がどのような意味を持っているかを理解することが重要である。

全身麻酔の人工呼吸時にはVCVを選択している事が多いと思われるが、気道内圧の上昇をきたした場合には、VCVの気道内圧波形から、その原因を推察することができる(図8)。VCVの気道内圧の立ち上がり部分は、気道抵抗に関与する部分である。従って、この立ち上がり部分の圧が上昇している場合、気道内圧上昇の原因は、気道抵抗の上昇によるものであると推察できる。一方で、プラトー圧は、肺泡のコンプライアンスに関連する。最高気道内圧とともにプラトー圧も上昇している場合は、コンプライアンスの低下によるものと推察できる。

VCVの気道内圧波形(経時曲線)

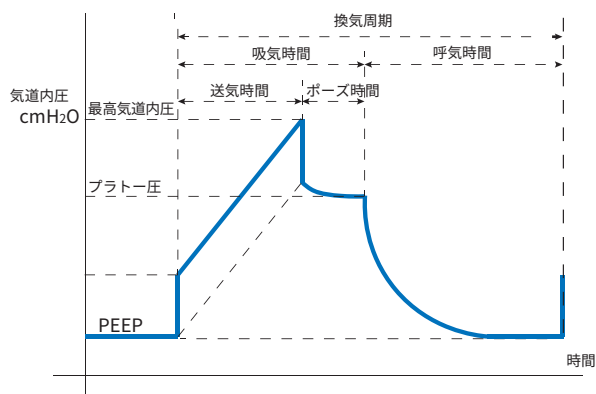


図6

PCVの気道内圧波形(経時曲線)

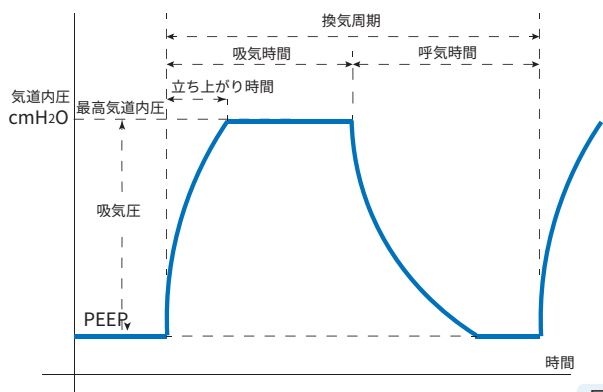


図7

VCVにおける気道内圧上昇の原因
気道抵抗上昇とコンプライアンス低下

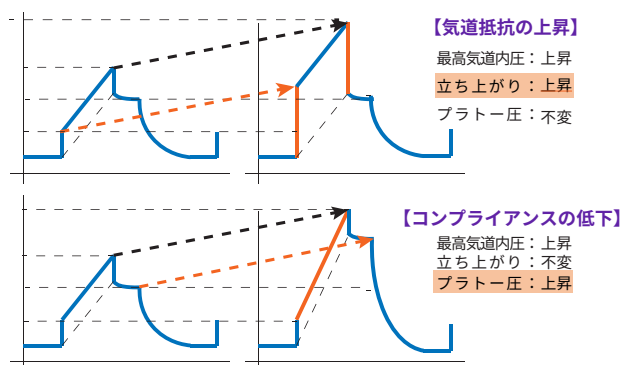


図8

4 流量経時曲線

VCVとPCVにおける流量経時曲線の違いは、吸気時に現れる(図9)。VCVにおいては、吸気流量は一定であるので、吸気流量波形は長方形を示す。PCVにおいては、吸気流量は漸減していくので、吸気流量波形は三角形を示す。一方、呼気は受動的に行われ、VCV、PCVとも同一である。

流量経時曲線から、auto PEEPの有無を知ることができる(図10)。呼気流量波形において、呼気終了時に基線まで戻らないことで診断できる。auto PEEPとは、肺胞内のガスが十分に呼出されずに呼気時間が終了してしまうために、次の吸気開始時に肺胞内の陽圧が残ってしまう状態のことをいう。この状態では、肺の過膨張による圧損傷や循環抑制のおそれがある。auto PEEPに対しては、呼気時間の延長や、少量のPEEP付加で対処する。

VCVとPCVの流量経時曲線の違い

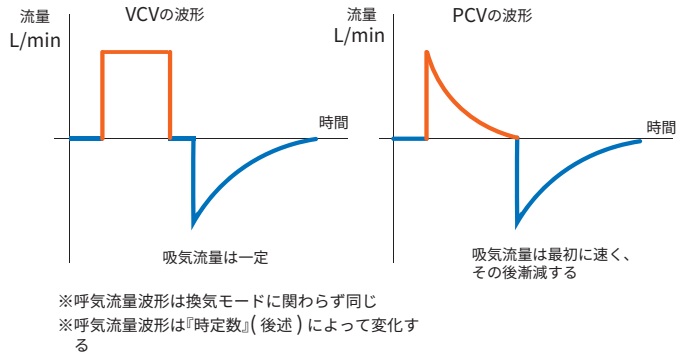


図9

auto PEEPと流量経時曲線

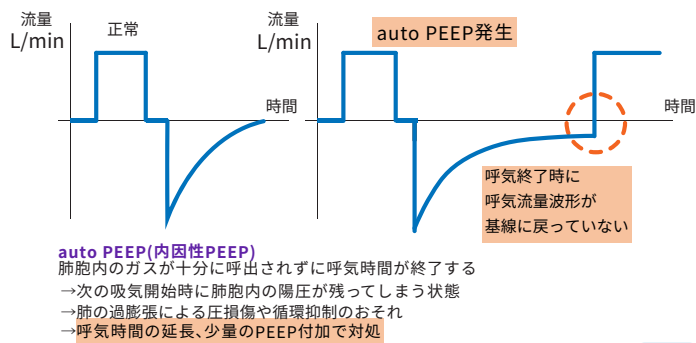


図10

5 流量容量曲線(F-Vカーブ)

流量容量曲線は、横軸に容量、縦軸に流量とした、呼吸周期に描かれるループ曲線である(図11)。VCVとPCVの流量容量曲線は、吸気時の波形が異なる(図12)。VCVとPCVの吸気流量パターンが異なるためであり、流量経時曲線の場合と同様である。

流量容量曲線の呼気相波形は、呼気直後に最大流量となり、その後直線的に減少していく形をとる(図13)。

この呼気相の傾きは、「時定数」によって決まることが知られている(図14)。

流量容量曲線(F-Vカーブ)

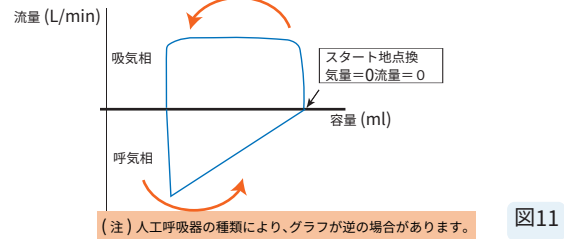


図11

VCVとPCVの流量容量曲線の違い

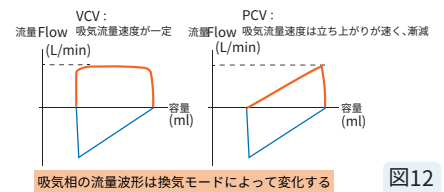


図12

正常の呼気相波形
呼気直後に最大流量となり、直線的に減少する

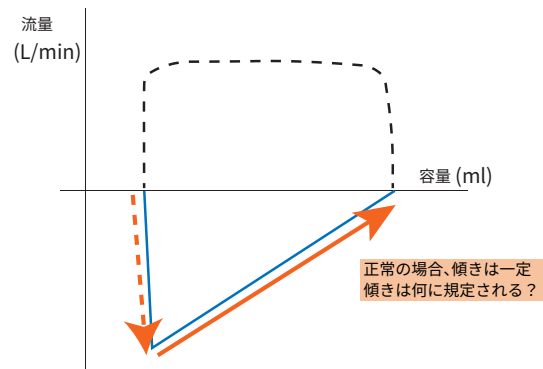
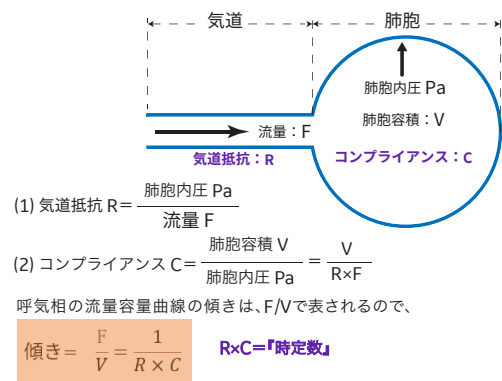


図13

時定数



流量容量曲線の呼気相の傾きは、
気道抵抗 × コンプライアンス (時定数) で決まる

図14



気道抵抗Rは、肺胞内圧Paと流量Fから $R=Pa/F$ と算出される。

一方、コンプライアンスCは、肺胞容積Vと肺胞内圧Paから

$C=V/Pa$ と計算される。

呼気相の流量容量曲線の傾きは、 F/V で表されるので、両方の式をまとめて F/V について解くと呼気相の傾き $=F/V=1/RC$ となる。このRC（気道抵抗×コンプライアンス）が「時定数」である。まとめると、呼気相の傾きは、気道抵抗とコンプライアンスの積（時定数）によって決まるのである。

そのため、換気量が同一の場合に呼気相の傾きが緩やかになった場合を想定すると、時定数が大きくなった、つまり、気道抵抗やコンプライアンスが高くなったことを意味する（図15）。病態としては、気管支喘息や慢性閉塞性肺疾患（COPD）が相当することになる。

呼気相後半の傾きが緩やかになる場合は、呼気後半での気道抵抗が高くなっていることを示している（図16）。少ない肺気量位で気道閉塞している。つまり、末梢気道閉塞の所見であり、COPD患者などで見られる。

呼気終末の流量のループが閉じない場合は、呼気流量がゼロにならない場合を示している（図17）。肺胞内ガスが十分に呼出されていない、つまりauto PEEPが存在していることを示している。呼気終末の容量のループが閉じない場合は、吸気換気量と呼気換気量が異なることを示している（図18）。つまり呼吸回路内にリークがあることを示しており、カフ無しチューブやラリングアルマスクの使用時に見られることがある。

呼気相の傾きと時定数

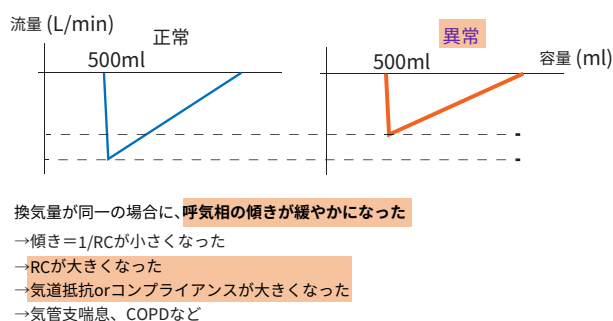


図15

呼気相後半の傾きが緩やかになる場合

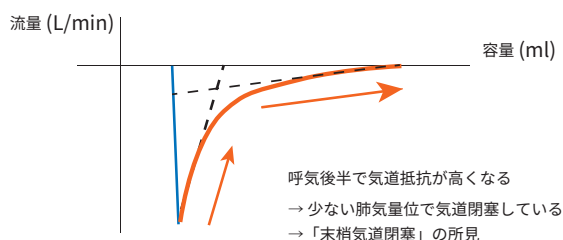


図16

流量の『ループが閉じない』場合

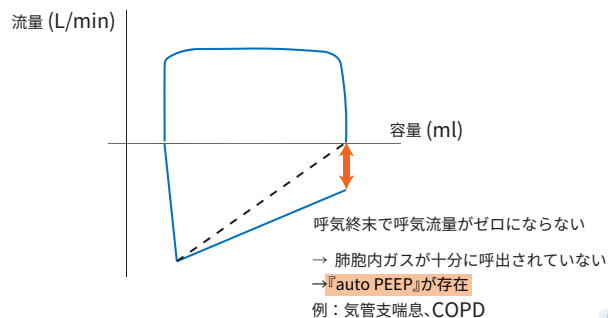


図17

換気量の『ループが閉じない』場合

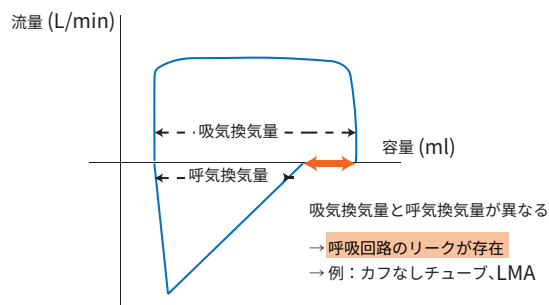


図18

6 圧容量曲線(P-Vカーブ)

圧容量曲線は、横軸に圧、縦軸に容量とした、呼吸周期に描かれるループ曲線である(図19)。PEEPを単純付加すると、圧容量曲線はPEEPの分だけ右方へ移動する(図20)。気道抵抗が上昇した場合は、気道内圧の上昇と比べて容量の上昇が遅れるので、曲線の横幅が広がる(図21)。一方、吸気開始時と呼気開始時を結んだ曲線の傾きは、原則不変である。

正常の圧容量曲線

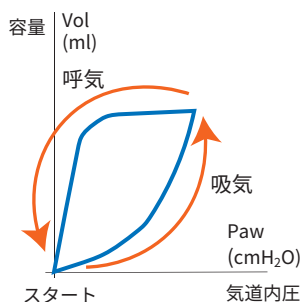


図19

PEEPを付加する

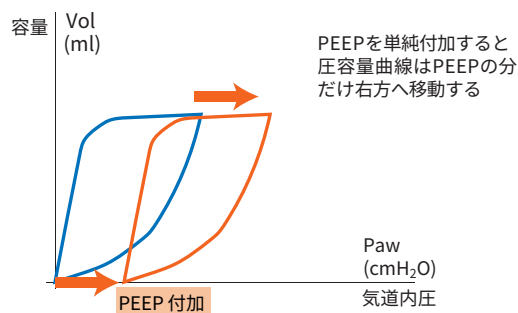


図20

圧容量曲線：気道抵抗が上昇した場合

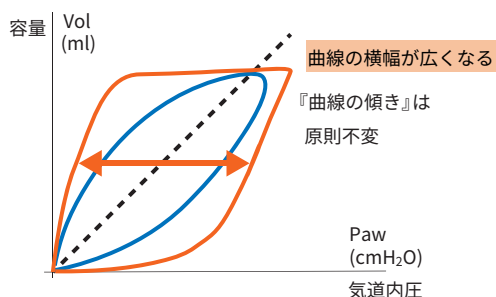


図21

それでは、圧容量曲線の傾きである、吸気開始時と呼気開始時を結んだ曲線の傾きは何を示しているのでしょうか。コンプライアンスの定義を考えてみると理解できる(図22)。

コンプライアンスCは、圧上昇分(ΔP)と、容量上昇分(ΔV)から、次のように定義される。 $C = \Delta V / \Delta P$
この $\Delta V / \Delta P$ は、まさに圧容量曲線における傾きに相当する。従って、圧容量曲線における傾きは、コンプライアンスに相当するのである。

従って、肺コンプライアンスが低下した時には、圧容量曲線における傾きが低下する(図23)。VCVで換気している場合には、容量が一定のまま、呼気開始時の気道内圧の上昇を伴う。コンプライアンスの低下時には、無気肺や腹部臓器による圧迫、ARDS、片肺挿管、気胸などを鑑別診断として考える必要がある。

圧容量曲線とコンプライアンス

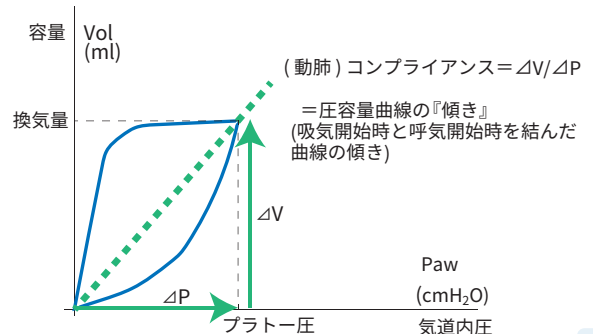


図22

コンプライアンスの低下

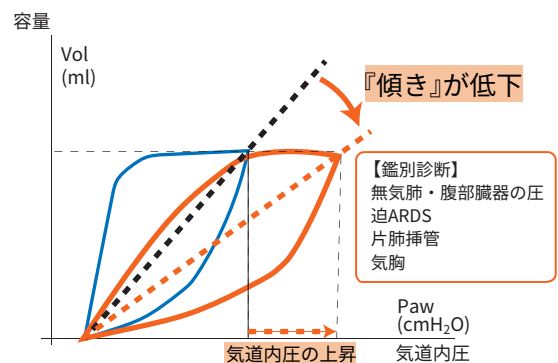


図23

無気肺による、コンプライアンスの低下時にPEEPを付加し、同時に肺リクルートメント手技を行なうと、肺コンプライアンスを改善させることができる。その際の圧容量曲線における変化を考察してみる(図24)。まず、PEEPを付加することで、曲線が右方移動する。肺リクルートメント手技により、無気肺が改善されると、曲線の傾きは改善する。

PEEP+肺リクルートメント手技

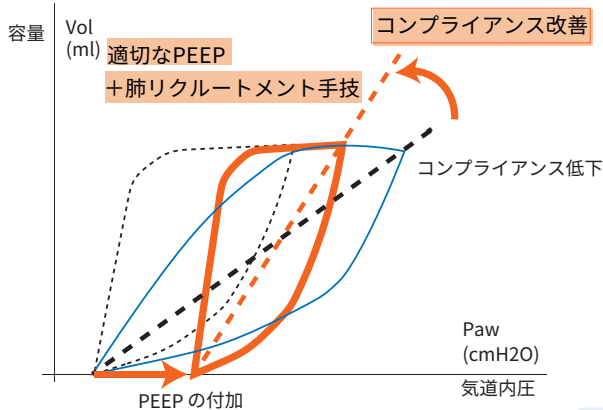


図24

圧容量曲線において、『鳥のクチバシ』様の変形を見ることがある(図25)。これは、吸気終末における最高気道内圧の上昇を示しており、肺の過膨張のおそれがある。このような所見が見られた場合、VCVの換気量を低く設定したり、PCVへの変更を行うことで改善することができる。

『鳥のクチバシ』サイン

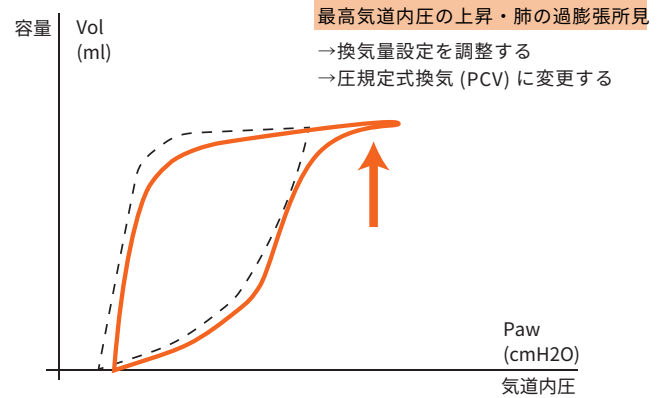


図25



おわりに

人工呼吸グラフィックモニタリングについて概説した。グラフィックモニタリングから病態生理学的情報を読み取ること
で、よりよい周術期呼吸管理に応用することを心がけたい。

*本資料に記載されている内容は、ランチョンセミナーの内容を要約したものであり、弊社が保証するものではありません。



Carestation 600 シリーズ
B650 モニタ搭載例



Carestation 750 シリーズ
Canvaシリーズモニタ搭載例



エイシス CS2
Canvasシリーズモニタ搭載例

❖ 本資料に掲載されている内容は、使用者の感想であり、仕様
値として弊社が保証するものではありません。

販売名称: Carestation 600シリーズ 医療機器承認番号: 22700BZX00422000
販売名称: エイシス 医療機器承認番号: 21900BZX00741000

販売名称: Carestation 750シリーズ
販売名称: Tec7気化器セボフルレン
販売名称: Tec7気化器イソフルレン

販売名称: CARESCAPEベッドサイドモニタシリーズ
販売名称: Tec800 シリーズ気化器 セボフルラン
販売名称: Tec800 シリーズ気化器 イソフルラン
販売名称: CARESCAPE ベッドサイドモニタ Canvas シリーズ
販売名称: CARESCAPE ONE モニター

医療機器承認番号: 30200BZX00223000
医療機器承認番号: 21500BZY00166000
医療機器承認番号: 21500BZY00167000

医療機器認証番号: 231ADBZX00011000
医療機器承認番号: 23000BZX00190000
医療機器承認番号: 23000BZX00189000
医療機器認証番号: 305ADBZX00092000
医療機器認証番号: 231ADBZX00022000



GE HealthCare

製造販売業者名: GEヘルスケア・ジャパン株式会社

記載内容は、お断りなく変更する場合がありますのでご了承ください。

© 2024 GE HealthCare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

Rev.LO 2024/3 9C・BK-AKE2[KM・KM] Bulletin N1F23 JB10619JA