

第1章

気道抵抗と肺コンプライアンス

疑問

- ▶ 気道抵抗はわかるけど、肺コンプライアンスとは？
- ▶ 呼吸時定数とは？
- ▶ 気道抵抗が高いと呼気時間が長くなる？ なぜ $EtCO_2$ は右肩上がり？
- ▶ 喘息患者での呼吸器設定では CO_2 が貯留していても呼吸数を下げる必要がある？
- ▶ 肥満患者での呼吸器設定は圧を高くする必要がある？ 胸郭コンプライアンスとは？
- ▶ 経肺圧と呼吸器設定の driving pressure は違う？

この章のゴール

次の数式の理解ができる。

$$P_V(t) - P_S(t) = R \cdot \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{C_L} + \frac{V(t)}{C_{CW}} \quad \dots (1)$$

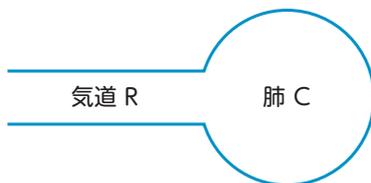
$P_V(t)$: 人工呼吸器が作る圧 (陽圧)	時間で変化する変数	[cmH_2O]
$P_S(t)$: 自発呼吸が作る圧 (陰圧)	時間で変化する変数	[cmH_2O]
R	: 気道抵抗	定数	[$cmH_2O \cdot sec/mL$]
C_L	: 肺コンプライアンス	定数	[mL/cmH_2O]
C_{CW}	: 胸郭コンプライアンス	定数	[mL/cmH_2O]
$V(t)$: 肺容積	時間で変化する変数	[mL]
$\frac{dV(t)}{dt}$: 気流量		[mL/sec]

1-1

チューブ・バルーンモデル

さて、集中治療ときってもきれいな内容として、最初に取り上げるのは呼吸生理です。気道抵抗、肺コンプライアンス、胸郭コンプライアンス、経肺圧、呼吸時定数……。こういう内容を理解するのに役立つのが、次に紹介する呼吸器のチューブ・バルーンモデルです。

図1 チューブ・バルーンモデル



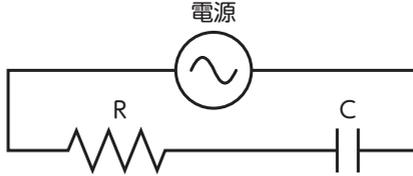
呼吸器を「抵抗 R のストロー」と「コンプライアンス C のゴム風船」とざっくりみなしてしまうモデルです。モデルの前提条件として、以下のようなものがあります。現実とは違いますが、このように単純化することによって、物事の本質がみえてきます。

前提条件

- ・ R と C は一定
- ・ 気流は一様な層流
- ・ 圧が 0 で気流も 0 のとき、肺容積は 0（ゴム風船はしぼみきる）
- ・ 肺容積はどこまでも大きくなる（風船は破れない）

ここで、高校時代へとタイムスリップしましょう。皆さん覚えていますでしょうか？ 高校物理で出てくる RC 直列電気回路です。

図 2 RC 直列電気回路



こちらの図には少しなじみがあるのではないのでしょうか？ 実は、チューブ・バルーンモデルと RC 直列電気回路は、数学的には全く同じです。まずは、RC 直列電気回路から復習していきましょう。登場する役者は次の通りです。

$E(t)$: 電源が作り出す電圧	時間 t で変化する変数	[V]
R : 電気抵抗	定数	[Ω]
C : コンデンサーの静電容量	定数	[F]
$Q(t)$: 電荷	時間 t で変化する変数	[C]
$I(t)$: 電流	時間 t で変化する変数	[A]

単位についてもおさらいしましょう。[V] はボルト、[Ω] はオーム、[F] はファラデー、[C] はクーロン、[A] はアンペアです。懐かしい響きですね。

ここで、電流というのは、電荷の時間的な変化（電荷の時間微分）ですので、

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad \dots\dots (2)$$

となります。

まずは、電気抵抗について考えてみましょう。図3のように右向きに電流 $I(t)$ が

流れているとき、A に比べて B の電圧は低下します。その電圧差を $E_R(t)$ とすると

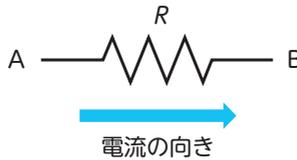
$$E_R(t) = R \cdot I(t) \quad \dots\dots (3)$$

となります。ここで、式(2)を用いると

$$E_R(t) = R \cdot \frac{dQ(t)}{dt} \quad \dots\dots (4)$$

となります。

図3 電気抵抗

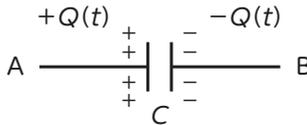


次に、コンデンサーについて考えてみましょう。図4のように電極に $Q(t)$ の電荷がたまっているとき、A に比べて B の電圧は低下します。その電圧差を $E_C(t)$ とすると

$$E_C(t) = \frac{Q(t)}{C} \quad \dots\dots (5)$$

となります。

図4 コンデンサー



では、電気抵抗とコンデンサーを図5のように直列でつないでみましょう。このとき A と B の電圧差は式(4)と式(5)の足し算になりますので、

$$E_R(t) + E_C(t) = R \cdot \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{C} \quad \dots\dots (6)$$

となります。

図5 電気抵抗とコンデンサーの直列つなぎ



ここで、図2のRC直列電気回路に戻ると、電源がつながって回路は閉じていますので、結局、電源が作り出す電圧 $E(t)$ は、次のようになります。

$$E(t) = R \cdot \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{C} \quad \dots\dots (7)$$

これと、チューブ・バルーンモデルはまさに同じです。それぞれがどう対応するのかを表1にまとめました。

表1 RC直列電気回路と呼吸器チューブ・バルーンモデルの対応

RC直列電気回路		呼吸器チューブ・バルーンモデル	
電気抵抗	R	気道抵抗	R
静電容量	C	肺コンプライアンス	C
電荷	$Q(t)$	肺容積	$V(t)$
電流	$\frac{dQ(t)}{dt}$	気流量	$\frac{dV(t)}{dt}$
電圧	$E(t)$	呼吸器にかかる圧	$P(t)$

チューブ・バルーンモデルの式を示します。式(7)とそっくりですね。

$$P(t) = R \cdot \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{C} \quad \dots\dots (8)$$

では、あらためて、式(8)を細かくみていきましょう。

まず、気道（ストロー）の部分です。気道で消費される圧を $P_A(t)$ とすると、

$$P_A(t) = R \cdot \frac{dV(t)}{dt} \quad \dots\dots (9)$$

となります。日本語で書くと、「気道で消費される圧」=「気道抵抗」×「気流量」です。気道抵抗は定数ですので、「気道で消費される圧」は「気流量」に比例し、そ