GE HealthCare

Appliguide

CO_2モニタリング とカプノメトリ

臨床例

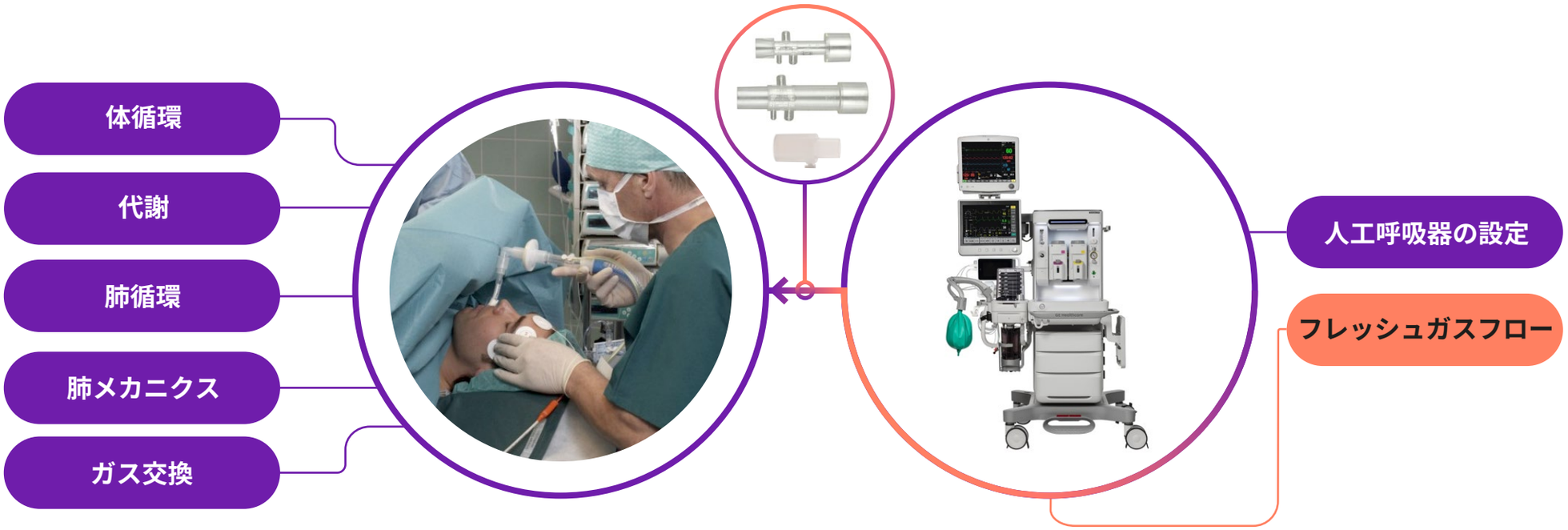
Note: 示された臨床例は実際の症例ではなく、記載された条件下で測定値がどのような変化を示すかを説明するために作成されたものです。

目次

1 カプノメトリ	2 呼吸に関連したトラブルに対する各パラメータのレスポンスタイム	3 CO_2の生成,輸送,および排出
4 $ETCO_2$を使用した換気制御	5 換気の違い	6 正常な換気血流比
7 換気-血流ミスマッチ	8 正常なカプノグラム	9 カプノグラフィー
10 Normoventilation(肺換気が標準的な状態)の利点	11 低炭酸ガス血症/過換気	12 高炭酸ガス血症/低換気
13 再呼吸	14 食道挿管	15 心停止と蘇生、$EtCO_2$波形が突然0(ゼロ)になる
16 血管収縮薬、重炭酸ナトリウム ターニゲット(止血帯)	17 自発呼吸の努力	18 部分的に閉塞した気道
19 CO_2波形の突然の消失	20 $ETCO_2$ の急激な減少	21 心原性振動
22 サンプリング流量の影響	23 クリニカルベネフィト	24 参考資料

カプノメトリ

換気、循環、代謝を簡単に追跡する方法



CO_2モニタリングの具体的な利点:

- 継続的
- 非侵襲的
- 簡単
- 人工呼吸器関連のトラブル防止に役立つ可能性がある
- 最適化された換気のフォローアップ
- 気管挿管の迅速な確認
- 気道のトラブルや人工呼吸器またはガス供給ユニット故障の検出
- 換気の適切性を客観的に、継続的に、非侵襲的に指標化する
- ガス交換、循環、代謝の異常を容易に認識できる
- $EtCO_2$の傾向が$PaCO_2$の変化を概ね反映するため、頻繁な血液ガス分析の必要性を減らすのに役立つ可能性がある

呼吸に関連したトラブルに対する各パラメータのレスポンスタイム

表[1]は、いくつかのクリティカルな状況において$EtCO_2$と$Fi\text{-}EtO_2$の検出速度がいかに速いかを示しています。SpO_2は広く使用されていますが、そのレスポンスタイムはエアウェイガスよりもはるかに遅いです。SpO_2は末梢部位で測定され、$EtCO_2$は肺胞の値を現します。

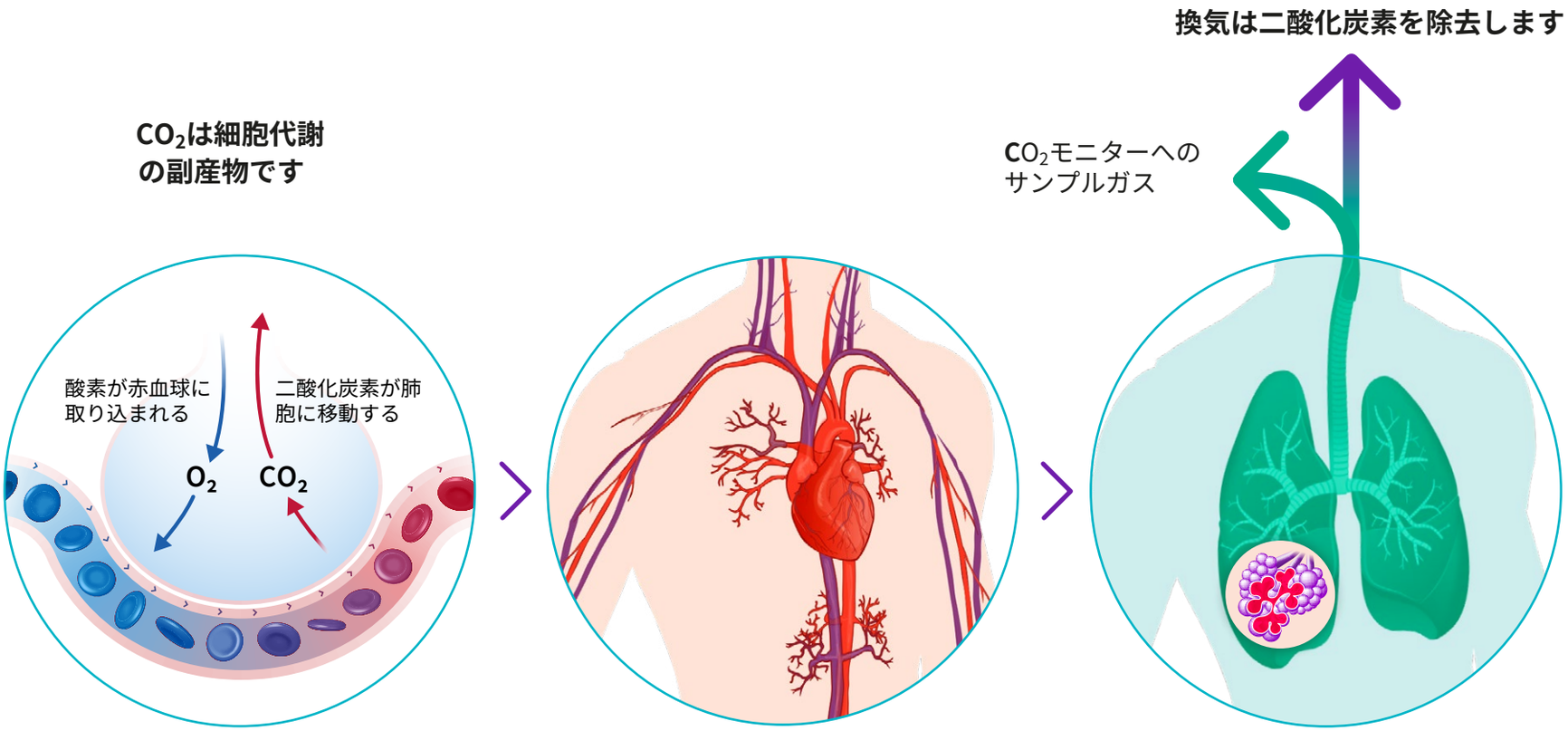
	食道挿管	接続部位の外れ	突然の過呼吸	突然の回路性低酸素症	塞栓症	悪性高熱症
FiO_2	🔴	🟢	🔴	🟢	🔴	🔴
EtO_2	🟢	🟢	🟢	🟠	🟠	🟢
$Fi\text{-}EtO_2$	🟢	🟢	🟢	🟢	🟠	🟢
$EtCO_2$	🟢	🟢	🟢	🔴	🟢	🟠
SpO_2	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴	🔴

レスポンスタイム 🟢 Fast <20s　🟠 Slow <60s　🔴 Late >60s

[1] Stenqvist O, Paloheimo M, Meriläinen P, Paloviita P. Patient Oxygen Appliguide - your margin of safety. Datex Division Instrumentarium Corp, 1992.

CO_2の生成,輸送,および排出

グルコースの酸化はエネルギー代謝の重要な部分であり、CO_2は継続的に除去されるべき廃棄物です。二酸化炭素は、細胞から毛細血管の血液に拡散し、その後、末梢から右心房に戻る静脈循環に移動します。心臓が収縮すると、混合静脈血は肺循環を通じて肺に送られ、ガス交換が行われます。呼吸の呼気フェーズでは、体からCO_2が排出されます。肺は完全に空になるわけではありませんが、呼気の最後の部分はほぼ純粋な肺胞ガスです。



CO_2は毛細血管の血液に拡散する

循環はCO_2を肺に運ぶ

CO_2は肺胞に拡散する

$EtCO_2$を使用した換気制御

自発呼吸中、脳にある呼吸中枢は代謝に応じて分時換気量を増減させることで、PaCO2を約40 mmHgに自動的に調整します。

人工呼吸中に鎮静剤を使用すると、呼吸ドライブに悪影響を及ぼす可能性があります。その場合、モニタリングなしでは正常換気を適切に維持することができません。筋弛緩剤が存在する場合、自発呼吸が停止し、換気の継続的なモニタリングの必要性がさらに明確になります。

自発呼吸

$PaCO_2$

呼吸ドライブは正常二酸化炭素状態を維持します。

機械換気

$ETCO_2$

連続的な$EtCO_2$モニタリングは、二酸化炭素の生成に比例した分時換気量の適応性を反映します。

換気の違い

周術期ケア

- 主に計画された手術である
- 患者は一般的に健康肺である
- 患者は麻酔をかけられ、しばしば鎮静状態である
- 呼吸仕事量での懸念はない
- 短期的なモニタリング

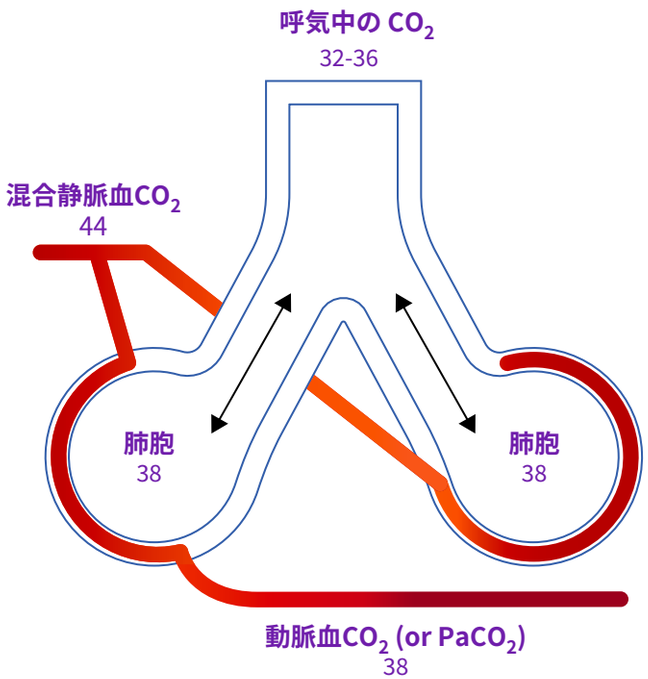
集中治療

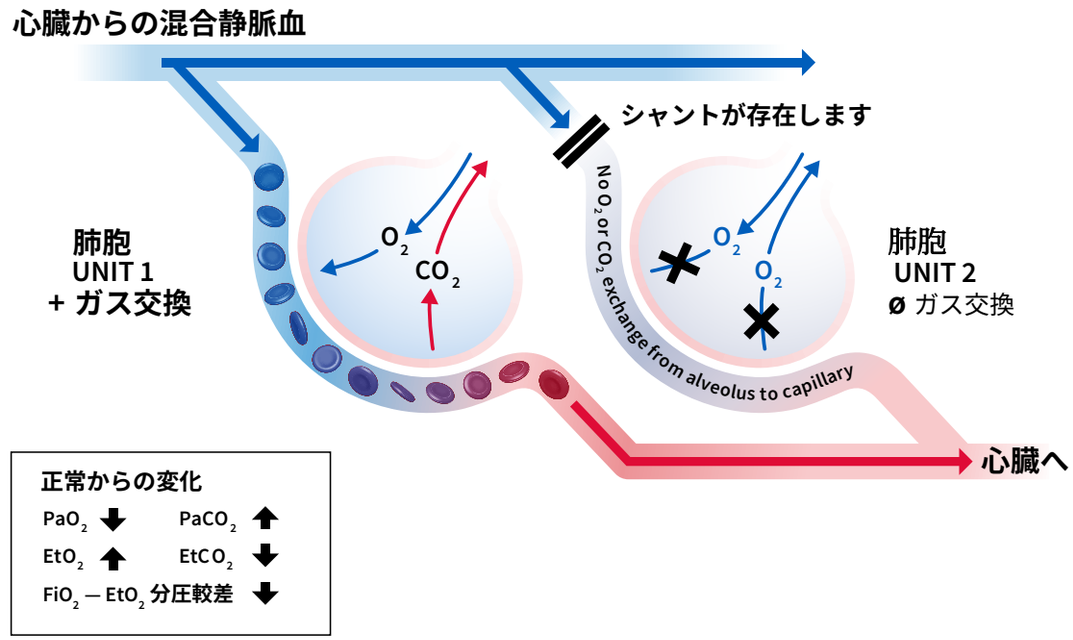
- 非常に複雑で、適切でない時期に開始される
- 多くの異なる病状や外傷・自発呼吸を維持しようとする
- 患者は麻酔をかけられ、しばしば鎮静状態である
- 呼吸仕事量を最小限に抑えようとする

正常な換気血流比

A-aCO2(肺胞気動脈血二酸化炭素分圧較差)に有意な差はない

健康な人では、最適な換気-血流比を持つ場合、A-aCO2 (肺胞気動脈血酸素分圧較差)の差は通常1〜4 mmHgです。この差は、肺胞内の換気と血流の不一致によるものです。健康な患者でも、肺の一部は換気が血流よりも優れている、またはその逆の部分があります。





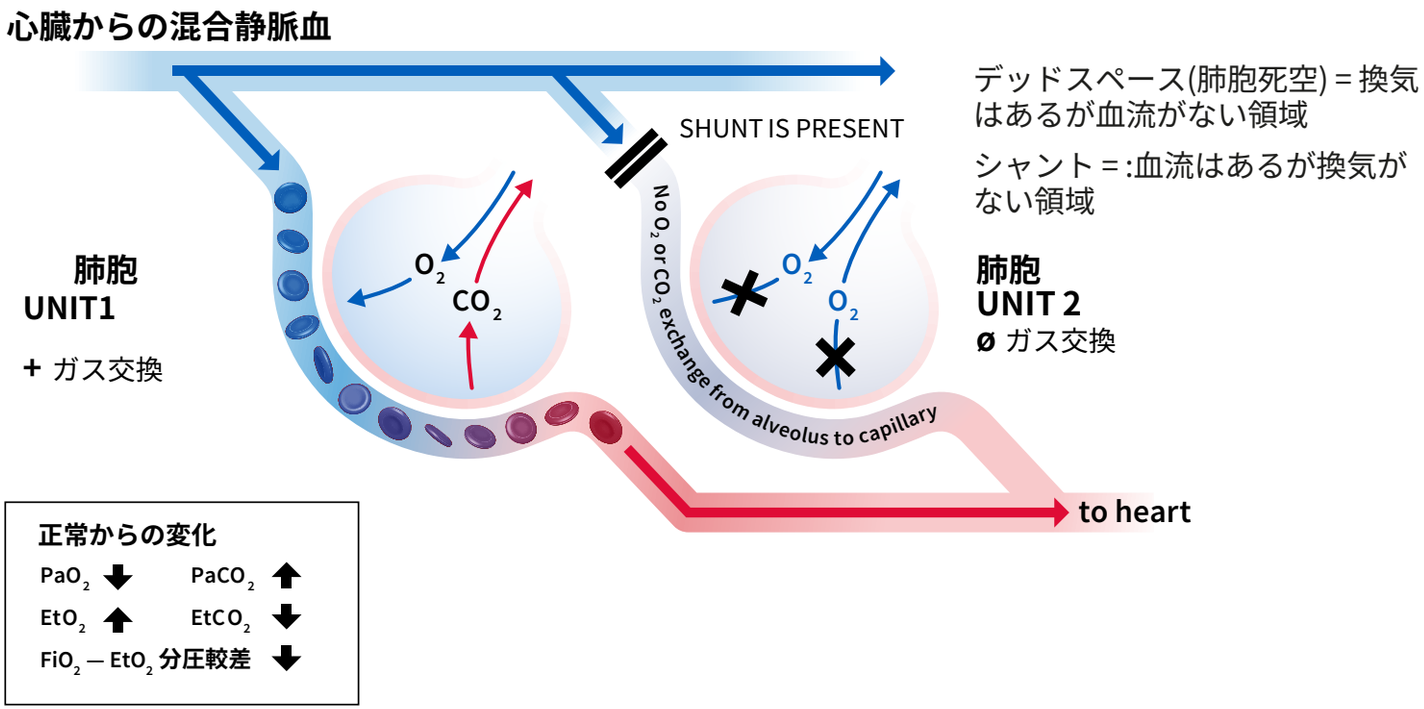
a=動脈

A=肺胞

換気 / 血流ミスマッチ

A-aCO2(肺胞気動脈血二酸化炭素分圧較差)の増加

カプノグラフィーはETCO$_2$に関する連続的な情報を提供し、PaCO$_2$（血液ガス分析）との変化を比較することで、換気と血流の不一致の程度を追跡し、血液ガス分析の頻度を減らすことができます。



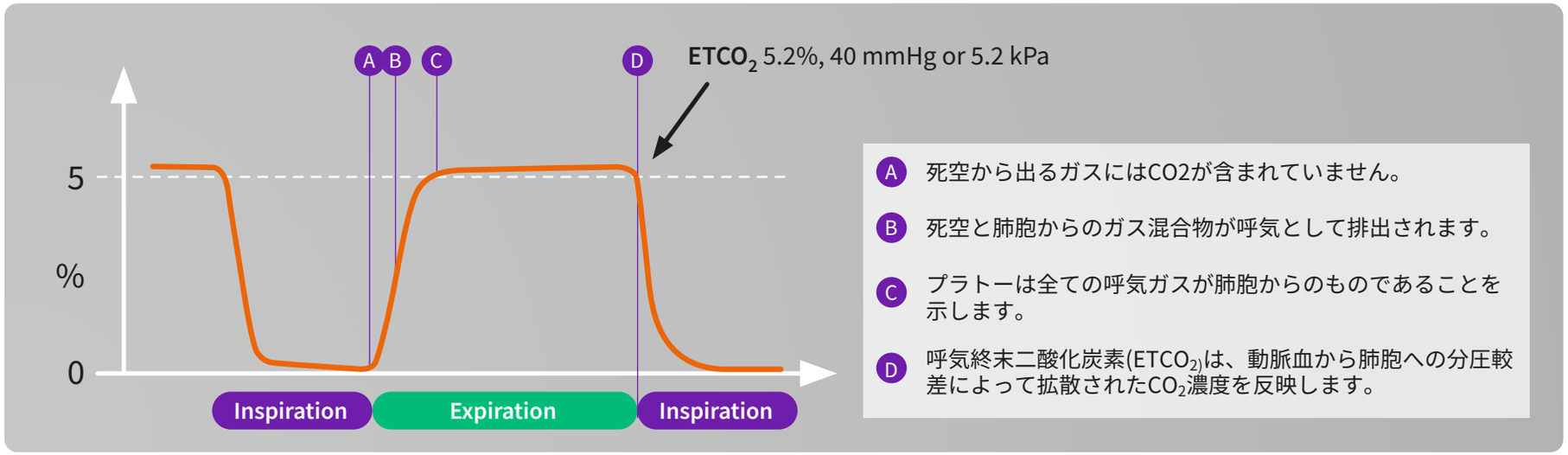
肺の一部は良好に灌流されていても、換気が不十分な場合もあります。シャント灌流の主な理由は以下の通りです。

- 気管支の閉塞（粘液、異物、感染）
- 片側気管内挿管
- クロージングボリュームの増加(横隔膜が肺を押し付ける）

デッドスペース換気の主な理由は以下の通りです。

- 肺血栓塞栓症
- 患者の体位（側臥位）
- 肺低灌流

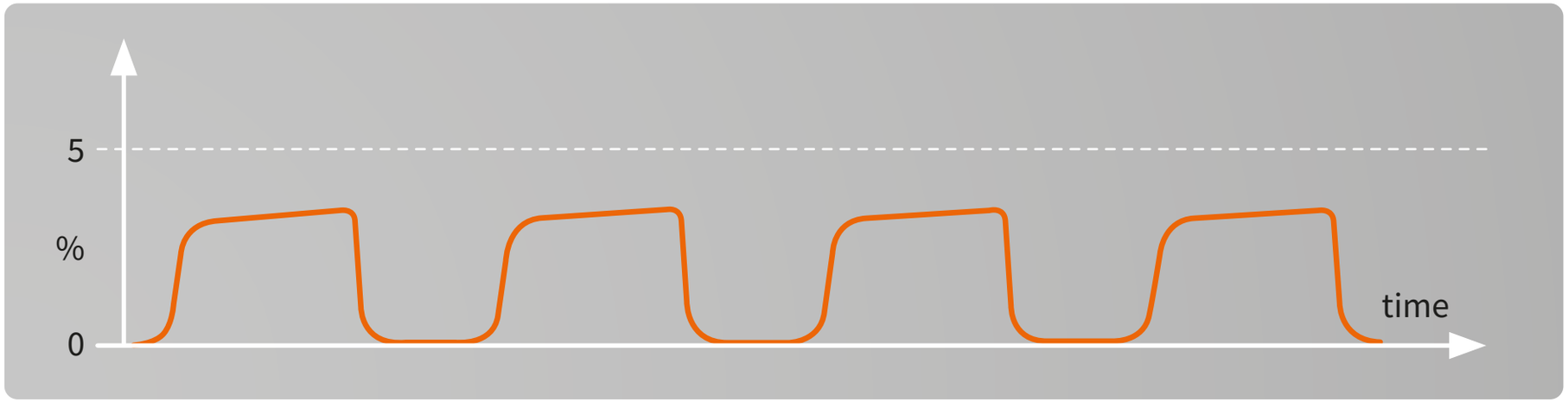
正常なカプノグラム



CO_2波形はカプノグラムと呼ばれ、呼吸のさまざまな段階を反映します。カプノグラムは重要な診断ツールであり、その形状は基本的に健康な患者ではほぼ同一です。形状の変化があれば調べる必要があります。

$EtCO_2$は呼気終末のCO_2値を表し、通常はモニター画面に表示されます。

カプノグラフィー



正常二酸化炭素状態	**$EtCO_2$**	**4.6 - 5.9 vol %**	**35-45 mmHg[1]**
低炭酸ガス血症	**$EtCO_2$**	**less than 4.6 vol %**	**35 mmHg**
高二酸化炭素血症	**$EtCO_2$**	**more than 5.9 vol %**	**45 mmHg**

CO_2モニタリングに関する一般的な用語は以下の通りです

- "capno" は呼気中のCO_2レベルを意味します
- "hyper" は過剰を意味します
- "hypo" は不足を意味します
- "carbia" は血液中のCO_2レベルを指します

以下は、CO_2レベルの測定に使用される単位です：

次の変換式は、標準大気圧760 mmHg(海面および通常の体温)で十分な精度で使用できます：

vol % 体積百分率(ボリュームパーセント)

mmHg 水銀柱ミリメートル(ミリメートルマーキュリー)

kPa 分圧（キロパスカル）

1 vol % = 1 kPa, 1 kPa = 7.6 mmHg, 1 mmHg = 0.13 vol%

肺胞換気量は通常、正常炭酸ガス血症(normocapnia)を達成するために調整されます。この状態では、呼気終末二酸化炭素濃度($EtCO_2$)は4.6 ~ 5.9 vol % (35 ～ 45 mmHg)の範囲内にあります(海面に対応する大気圧および通常体温)

[1] $PetCO_2$ normal values:Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.

正常換気の利点は以下の通りです。

- 正常な生理機能の維持
- 正常な脳灌流の維持[1]
- 自発呼吸が容易に再現される

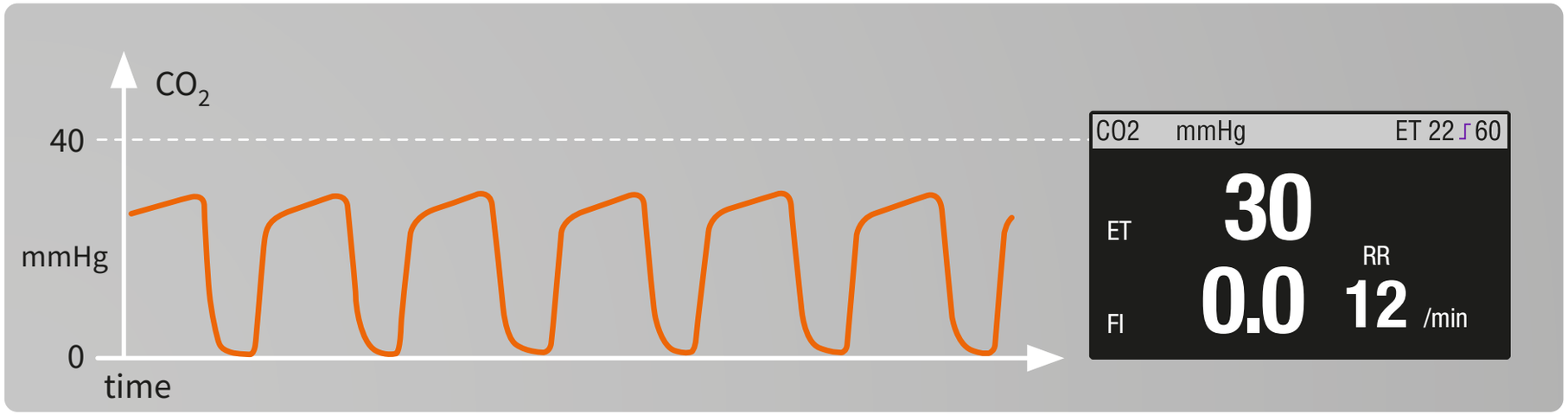
→ 短期間で順調な回復

正常換気により、換気、循環、代謝の乱れをより容易に認識でき、モニタリングにより生理学的に最適な分時換気量を維持することができます。麻酔終了時に$EtCO_2$の上昇を許容することで、自発呼吸がより容易に再開され、患者は通常、より迅速な回復を体験します。

長時間の麻酔中には、麻酔薬の抑制効果と低体温による代謝の低下の影響で、通常、$EtCO_2$が非常に緩やかに減少します。

[1] Z. Kalenda, Mastering Infrared Capnography, p48, 1989

低炭酸ガス血症/過換気[2]



正常より低いETCO$_2$レベル、すなわち4.6 vol %(35 mmHg)未満の状態を低炭酸ガス血症と呼びます。

可能性のある原因

- 過換気
- 心拍出量の低下
- 代謝の低下
- 低体温

麻酔中の低炭酸ガス血症の一般的な原因は、肺胞換気量が過剰に高いことです。(過換気)

リカバリーやICUにおいて、自発呼吸をしている患者の低炭酸ガス血症は、恐怖、痛み、ウイニングの失敗、またはショック(循環不全)による過換気が原因である可能性があります。

長期間の過換気のデメリットは以下の通りです。

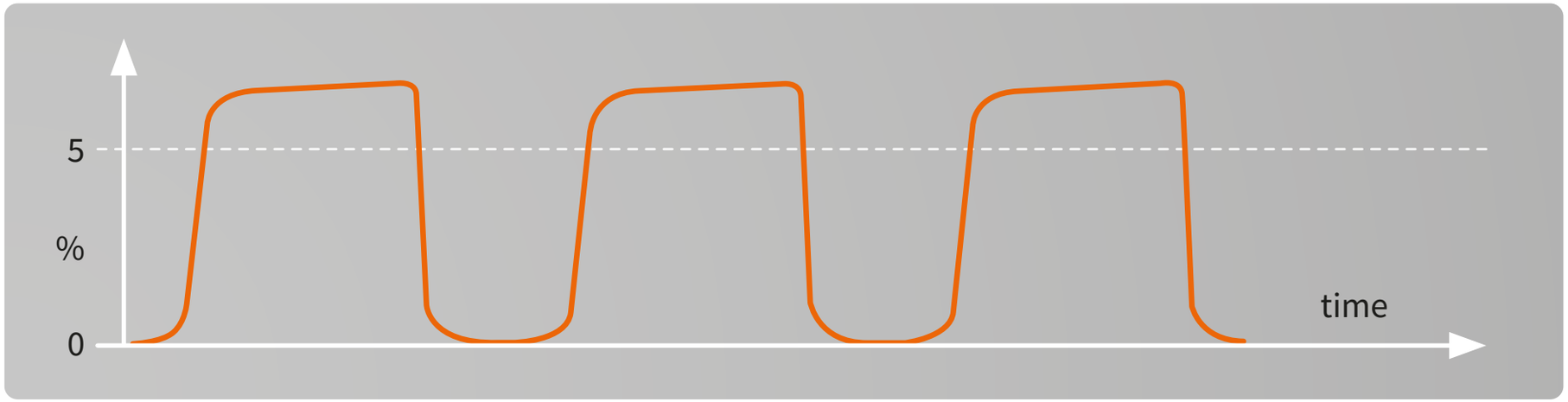
- 血管収縮による冠動脈血流および脳血流の減少
- 不要な呼吸性アルカローシス
- 呼吸中枢の抑制

特定の症例では、患者を過換気にさせることにメリットがある場合があります。例えば、神経麻酔では、低炭酸ガス血症を利用して意図的に脳灌流と頭蓋内圧を低下させることがあります。

[2] PetCO$_2$ normal values: Variables Associated with EtCO$_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.

Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

高炭酸ガス血症/低換気[2]



$ETCO_2$ 濃度が正常より高く、5.9%(45 mmHg)を超える場合は、高炭酸ガス血症(ハイパーカプニア)と呼ばれます

主な原因:

低換気

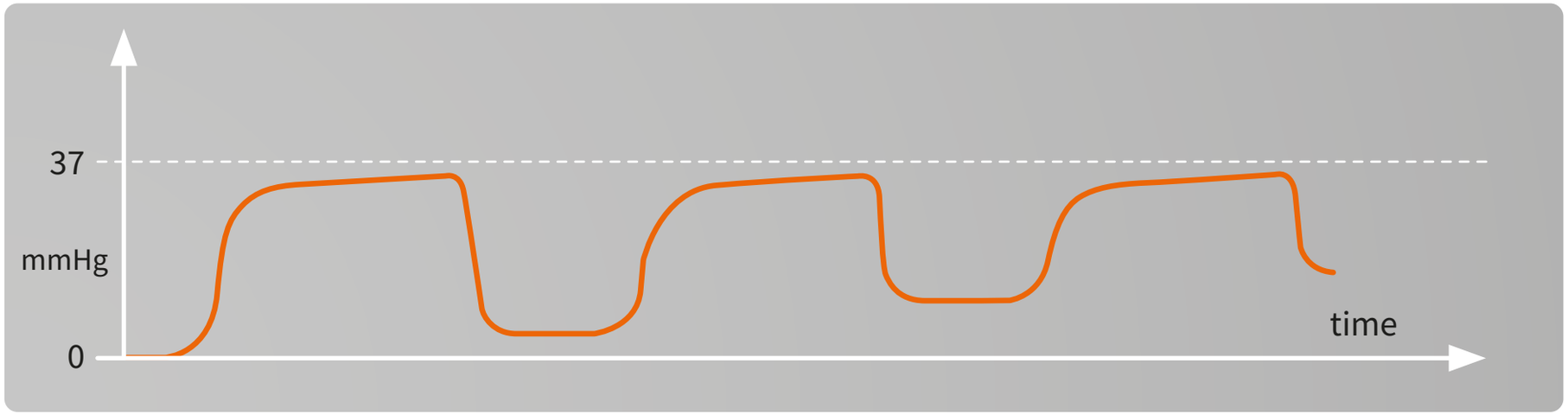
A. 自発呼吸
- 呼吸中枢の抑制
- 機械的障害(筋力低下、血胸/気胸、気道閉塞)

B. 機械換気
- 気道閉塞
- 気胸
- リーク
- 回路外れ
- 過剰栄養(過剰なカロリー摂取)

- 人工呼吸器の機能不全
- 機械換気の不適切な管理
- 再呼吸
- 許容性高炭酸ガス血症
- 循環不全
- 換気血流比(V/Q)の変化
- 代謝亢進 (例：熱傷患者など)
- 重炭酸ナトリウムの投与
- 代償性代謝性アルカローシスによる呼吸中枢の抑制

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

再呼吸[2]



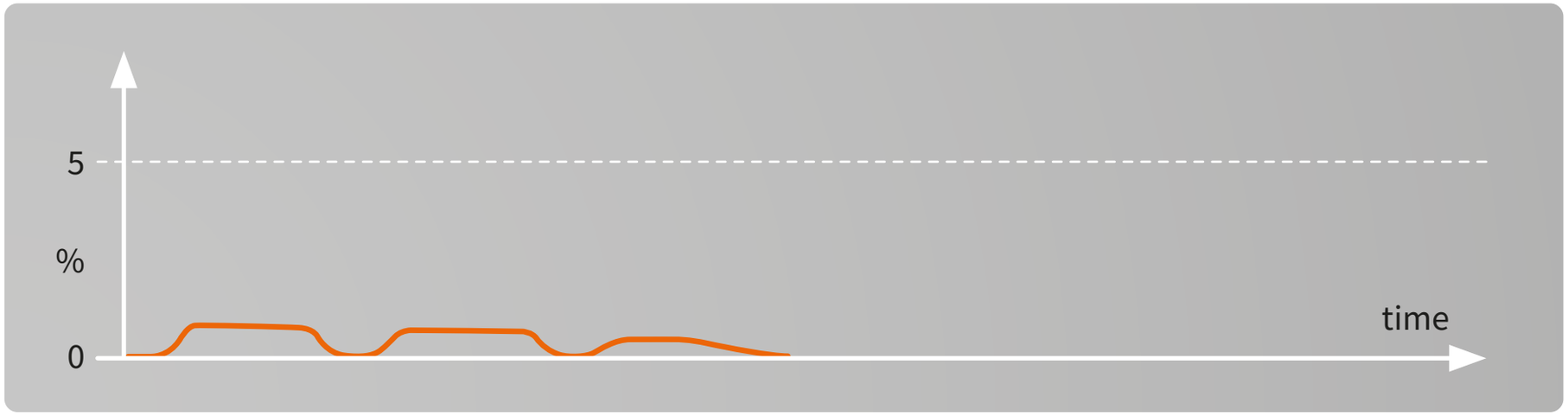
カプノグラムがベースラインに戻らない場合、呼気中のCO_2の再呼吸を示している可能性があります。これは、麻酔回路の構造上の特性(たとえば、Mapleson型呼吸回路など)や気管チューブのような機械的死空によるものかもしれません。また、呼吸循環回路におけるCO_2吸収剤の消耗が原因である可能性もあります。さらに、麻酔システム/人工呼吸器で設定されたフレッシュガス流量が不十分であることも原因となり得ます。
FiO_2のモニタリングは、最適なフレッシュガス流量を決定するための最良の方法である。

出典:『Understanding Anesthesia Equipment(麻酔機器の理解)』第5版,2008年,Lippincott Williams & Wilkins刊 & Wilkins.

呼気時間が短すぎてCO_2曲線が$EtCO_2$値を正確に示せない場合、次の吸気にCO_2が含まれることになり、これはベースラインの上昇として現れます。

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

食道挿管[2]



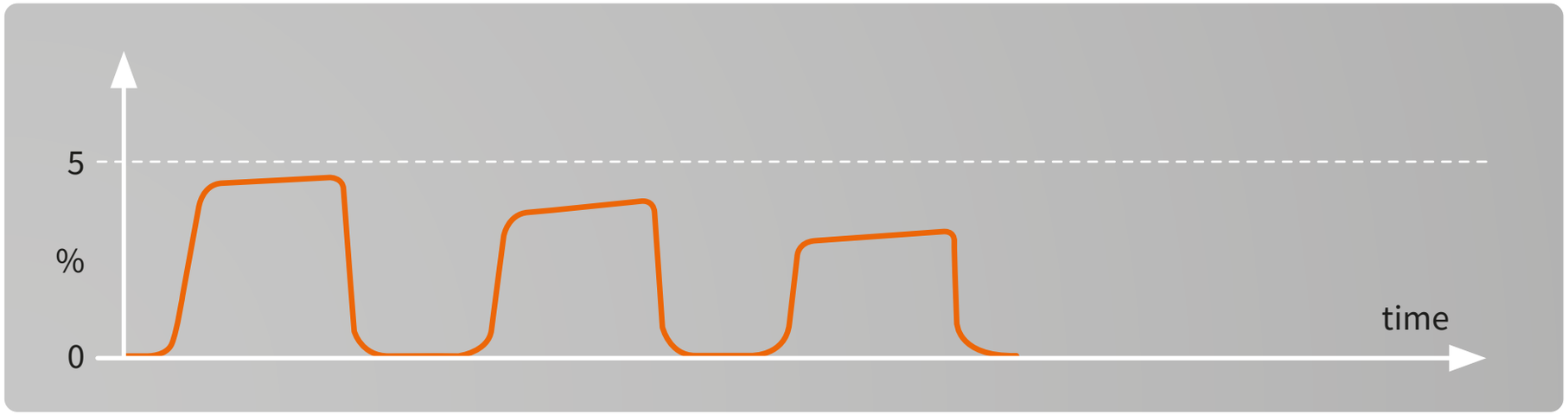
挿管が困難で、声帯が視認できない場合、気管チューブが誤って食道に挿入されることがあります。これがすぐに発見されなければ、患者は死亡する可能性があります。早期発見の最も優れた指標はカプノメトリー(CO_2測定)です。

用手気中にガスが胃に入ることで、ある程度のCO_2が検出されることがあります。気管チューブを抜去し、再挿管が成功した後には、無呼吸中に蓄積されたCO_2の影響で高い$EtCO_2$値が記録されます。

アメリカ心臓協会(AHA)は、気管チューブの正確な位置確認および心肺蘇生(CPR)中の胸骨圧迫の有効性を確認するために、カプノグラフィーの使用を推奨しています。

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

心停止と蘇生中の$EtCO_2$波形の変化[2]

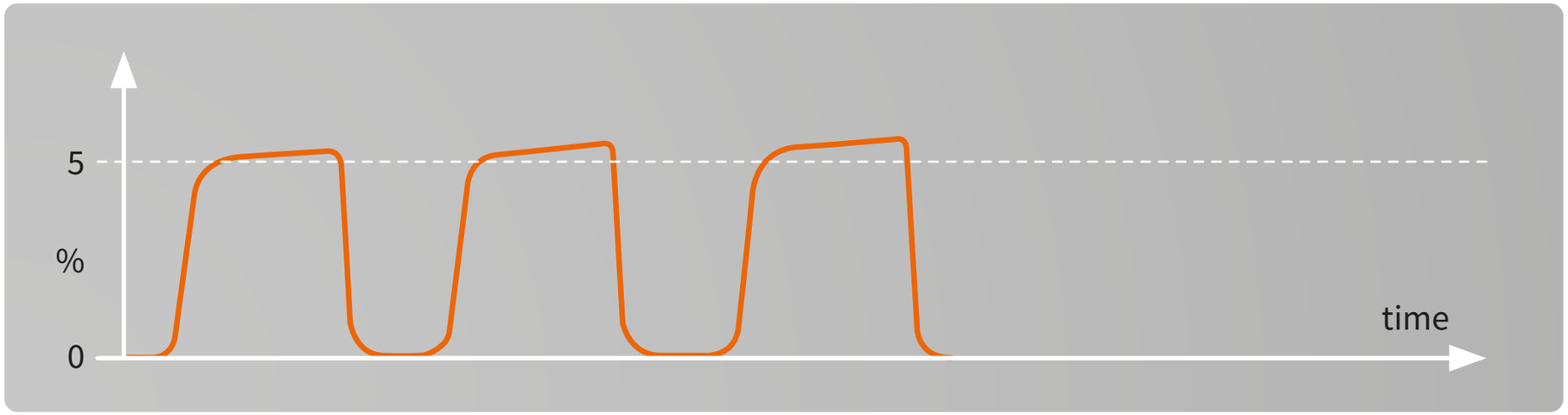


$EtCO_2$モニタリングは、心肺蘇生中に自己心拍再開(ROSC)を検出するための継続的な情報を提供します。

AHAの公式推奨事項(2020年)として定量的波形カプノグラフィーは、気管挿管の正確な位置確認および心肺蘇生(CPR)中の胸骨圧迫の有効性を評価するために使用すべきであると明確に記載されています。

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

昇圧薬、重炭酸ナトリウム、止血帯が$EtCO_2$に与える影響[2]

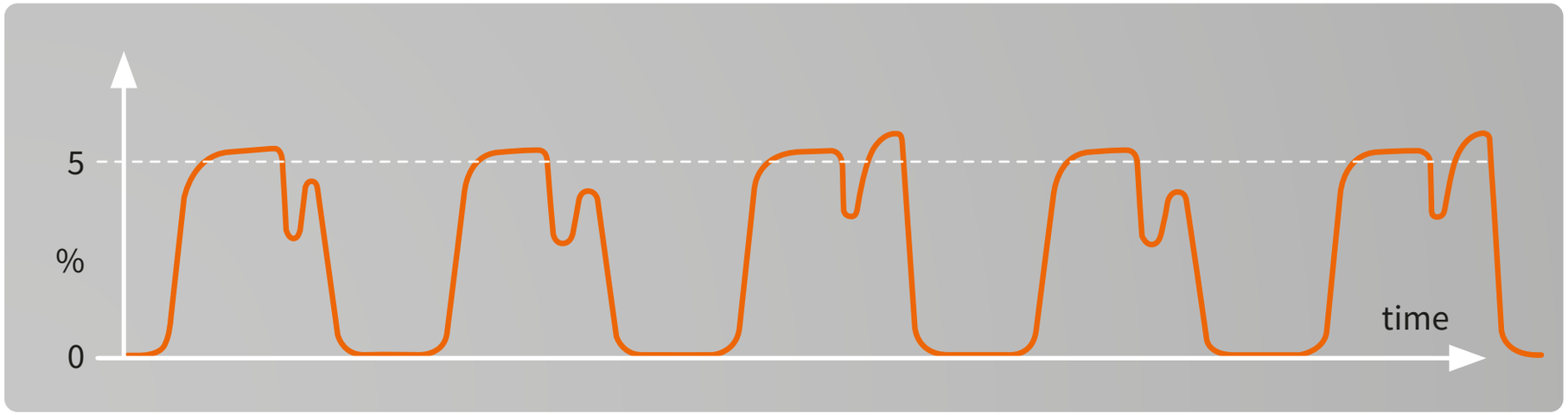


吸入CO_2がゼロのままであるにもかかわらず、$ETCO_2$が突然かつ一過性に上昇する場合、それは止血帯の解除や重炭酸ナトリウムの投与による可能性があります。

一部の整形外科手術では、術野を無血状態に保つために止血帯が使用されます。止血帯の使用により、四肢に虚血反応が生じ、解除後には酸性代謝産物が循環系に放出されます。この影響は、$ETCO_2$の一過性の上昇として現れることがあります。

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

自発呼吸の努力[2]

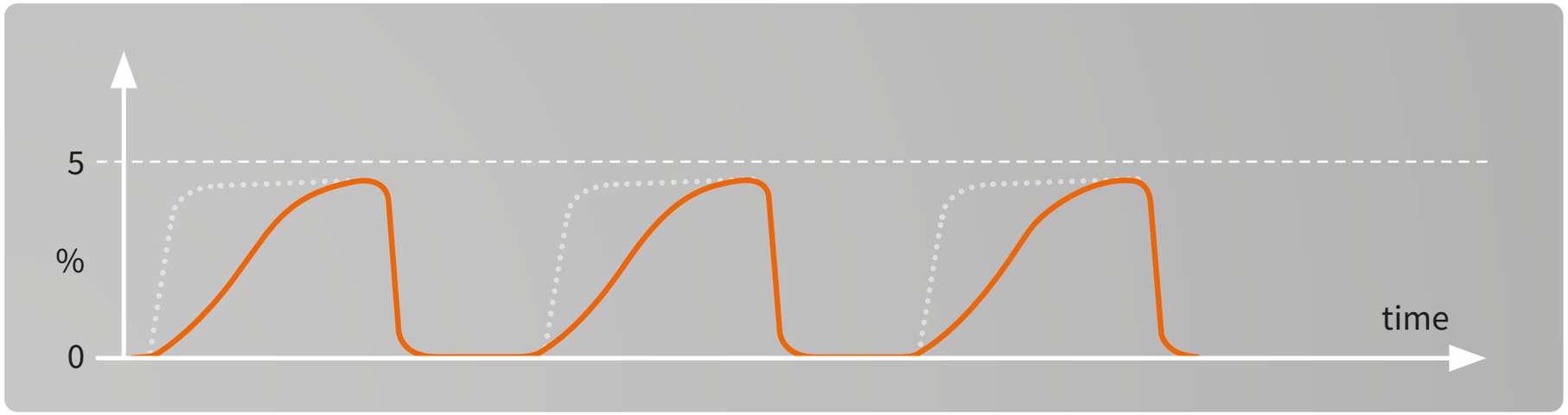


自発呼吸の努力は、“ラクダのこぶ”のようなカプノグラムとして現れることがある

筋弛緩が不十分、または麻酔の深さが不適切なために、患者が人工呼吸器に対して“同調していない”状態になっています。こうした浅い自発呼吸の努力は、カプノグラムのプラトー部分に“切れ込み（cleft）”として現れることがあります。

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

部分的に閉塞した気道[2]



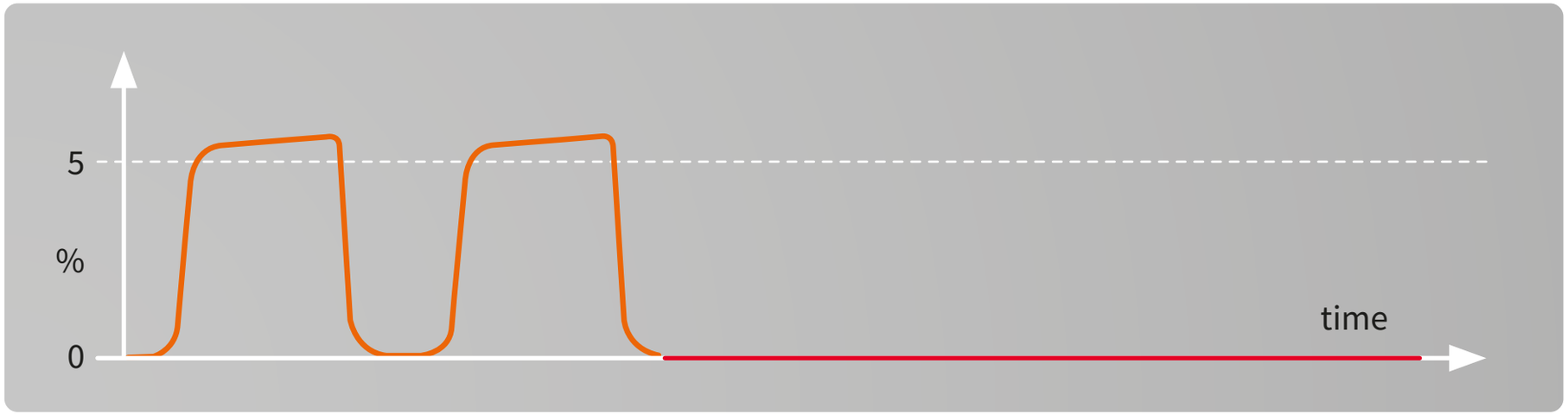
立ち上がりがゆっくりとした変形したカプノグラムは、気道の部分的な閉塞を示している可能性があります。

可能性のある原因:

- 分泌物
- 気管支痙攣
- 気管チューブの屈曲

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

CO_2波形の突然の消失[2]



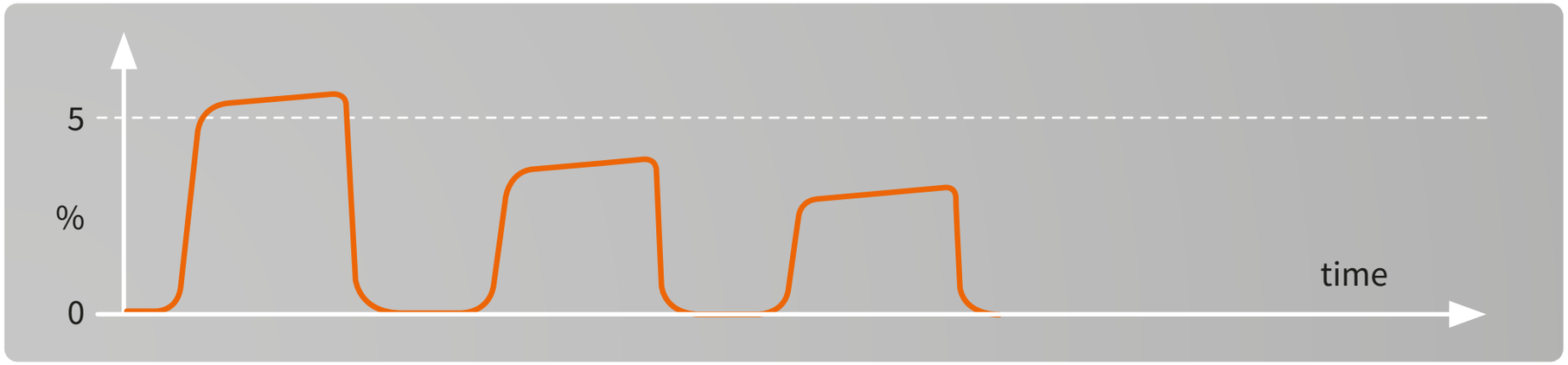
CO_2波形が正常だったのに、次の呼吸から突然ゼロになる。

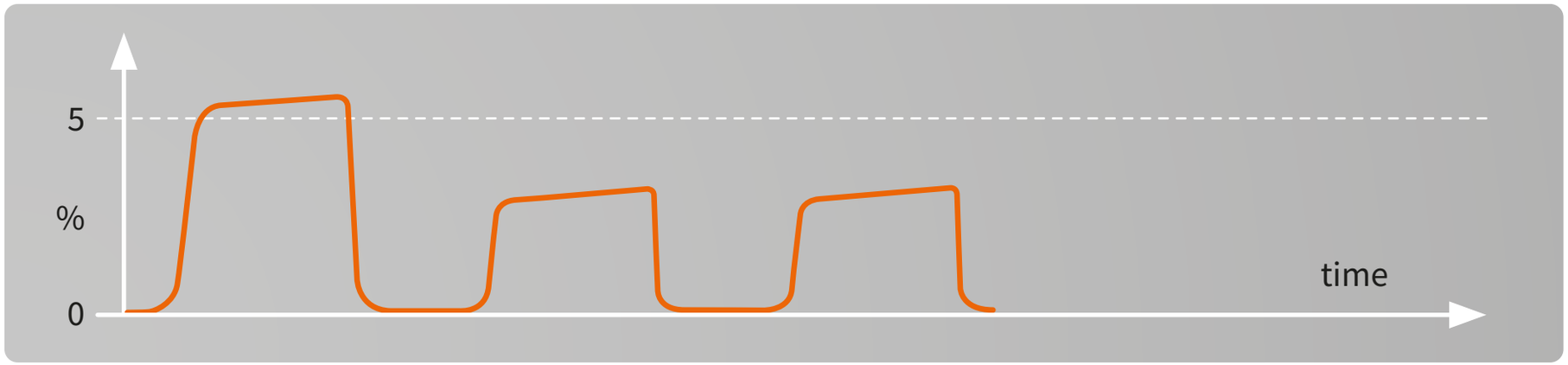
可能性のある原因

- 患者回路の外れ
- 気管チューブの完全閉塞
- ガスサンプリングラインの外れ
- 心停止

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

$ETCO_2$の突然の低下[2]



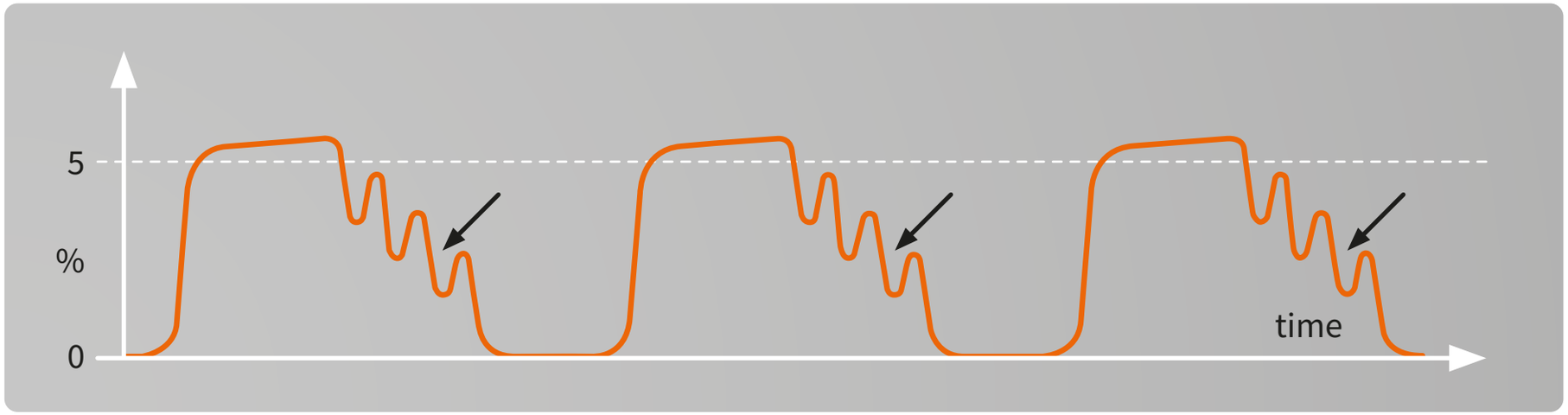


$ETCO_2$が数回の呼吸にわたって急激に低下する:

- 肺塞栓症
- 心停止
- 重度の低血圧(大量出血)
- ガスサンプリングラインのリーク

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

心原性振動[2]



呼気中のCO_2波形に見られる心原性振動は、サイドストリーム式のガスサンプリング中に心臓の収縮によって生じる胸部内で起こるガス移動によって引き起こされます。

可能性のある原因:

- 吸気側に直接供給される連続的なガスフロー
- Yピースで行われるサイドストリーム式のガスサンプリング
- 呼吸数が遅い
- 呼気時間が長い

[2] $PetCO_2$ normal values: Variables Associated with $EtCO_2$ Values. Prehospital Emergency Care, 16(2): 250-256.
Tobin, M. J., & Grenvik, A. (1984). Monitoring of the Patient in the Intensive Care Unit. New England Journal of Medicine, 310(18): 1170-1179.
https://www.jems.com/2017/08/01/how-to-read-and-interpret-end-tidal-capnography-waveforms/
https://www.capnography.com/

サンプル流量の影響

- 表は、呼吸数に応じた異なるサンプリング流量を示しています
- I;E比は1:2と仮定されています

※ サンプル流量(mL/分)やI :E 比の値を変更することで、1回の呼吸サイクルごとにサンプリングされるガスの分布を確認できます。

1回の呼吸における吸気相および呼気相でサンプリングされるガス量は、呼吸数およびI : E比に依存します。サンプル流量(V mL/分)およびI : E比を入力することで、サンプル流量の影響を確認できます。

サンプル流量	V (ml/min) =	120		
I:E 比	I =	1	E =	2
呼吸数 [breath/min]	吸気時間（秒）	呼気時間（秒）	吸気相でサンプリングされるガス量（mL）	呼気相でサンプリングされるガス量（mL）
10	2.0	4.0	4.0	8.0
20	1.0	2.0	2.0	4.0
30	0.7	1.3	1.3	2.7
40	0.5	1.0	1.0	2.0
50	0.4	0.8	0.8	1.6
60	0.3	0.7	0.7	1.3
70	0.3	0.6	0.6	1.1
80	0.3	0.5	0.5	1.0
90	0.2	0.4	0.4	0.9
100	0.2	0.4	0.4	0.8
110	0.2	0.4	0.4	0.7
120	0.2	0.3	0.3	0.7

サイドストリーム方式のガスアナライザーによるサンプル流量の影響は、表に示されています。モニターが吸引するガスの量は呼吸数に依存しており、呼吸数が増加すると1回の呼吸あたりにサンプリングされるガス量は減少します。また、サンプリングされる総ガス量は吸気相と呼気相の間で分配されます。

例：呼吸数が30回/分の場合(小さな乳児によく見られる値)、サンプリングされる総ガス量はわずか4mLであり、そのうち1.3mLが吸気中に吸引されます。これにより、120mL/分のサンプル流量でも乳児に対して使用可能であることがわかります。

クリニカルベネフィト

患者の安全

- 気管チューブの正しい位置を確認できる
- 過換気または低換気を迅速に検出するための連続測定が可能
- シャントの増加または減少の推定が可能
- $ETCO_2$のトレンドと$PaCO_2$との比較による評価

最適な分時換気量＝正常換気

参考資料

Brast, S., Bland, E., Jones-Hooker, C., Long, M., and Green, K. (2016). Capnography for the Radiology and Imaging Nurse: A Primer. Journal of Radiology Nursing, Volume 35, Issue 3, 173 – 190

Kodali, B. S. (2013). “Capnography Outside the Operating Rooms.” Anesthesiology: The Journal of the American Society of Anesthesiologists, 118(1): 192-201.

Brunetti, M. A., Santarelli, G., & Berrio, C. S. (2009). “Capnography in Emergency Medicine.”Journal of Emergency Medicine, 37(2): 239-245.

Ehrman, R. R., Guyette, F. X., & Ashton, J. A. (2012). “Capnography in Out-of-Hospital Cardiac Arrest

J. S. Gravenstein, M. B. Jaffe, N. Gravenstein, D. A. Paulus: Capnography. *Text book*

www.capnography.com

Capnography, Second Edition, Anesthesiology 3 2012, Vol.116, 744-745.

Rationales and Applications for Capnography, Monitoring During Sedation, Devin Carr, MSN, MS, RN, RRT, ACNS-BC, NEA-BC, CPPS and Anna Cartwright, BSN; RNClinicalfoundations.org

End-Tidal Capnography
Updated: Jan 17, 2020.
Author: Robert Thomas Arrigo, MD, MS; Chief Editor: Zab Mosenifar, MD, FACP, FCCP

How to Read and Interpret End-Tidal Capnography Waveforms

For additional clinical resources, please visit clinicalview.gehealthcare.com

この資料のいかなる内容も、病気や症状の診断や治療に使用すべきではありません。必ず医療専門家に相談してください。お客様の使用経験および文献に基づく記載です。仕様値として保証するものではありません。

© 2025 GE HealthCare.
GEは、General Electric Companyの商標であり、商標ライセンスに従って使用されています。GE HealthCare からの事前の書面による許可なしに、いかなる形式でも複製することは禁止されています。

2025年6月　JB12362JA

GE HealthCare