

症例  
ライブラリー

## 波形を読む

SpO<sub>2</sub>が低下  
消化管穿孔の麻酔導入時に

## ■症 例

70歳の独居男性。身長170 cm、体重80 kg。朝から続く腹痛で、夜も眠れないほどになったため23:00に救急外来を受診した。その後の診察で、大腸憩室の穿孔に伴う汎発性腹膜炎の診断となり、緊急手術が申し込まれた。

当直の麻酔科医が外科医に既往症を聞いたところ「高血圧・高尿酸血症と軽度の耐糖能異常くらいで、普通に一人暮らしをしていたようです。」とのことだった。お薬手帳は家に忘れて内服薬は不明だったが、問診では「血圧と血の巡りをよくする薬を飲んでいる。」という情報が得られた。腹痛のため、朝から飲まず食わずだった。

CT画像では胃内容物はなかったため、プロポフォール・レミフェンタニル・ロクロニウムによる急速導入を計画した。手術申し込み後ただちに手術室へ搬送され、左中指にパルスオキシメータ、右上腕に非観血的血圧計が装着された。心拍数(HR)80 bpm 洞調律、血圧(BP)183/98 mmHg、経皮的末梢動脈血酸素飽和度(SpO<sub>2</sub>)99%だった。このときのパルスオキシメータ波形を図1に示す。

前酸化の後に麻酔薬の投与を開始した。プロポフォール100 mgを静注したところすみやかに入眠が得られた。ロクロニウム50mgを投与し、セボフルランのダイヤルを1%として用手換気を開始した。このときのバイタルサインはHR75 bpm 洞調律、BP113/58 mmHg、SpO<sub>2</sub>100%だった。この際のパルスオキシメータ波形を図2に示す。

筋弛緩モニターでTOF:0になるのを用手換気しつつ待った。ロクロニウム投与後3分経過した時点でTOFが0になったため気管挿管をしようと喉頭鏡に手を伸ばした瞬間にSpO<sub>2</sub>の音階が下がり始めたのが聞こえた。担当麻酔科医は「おや?」と思いつつモニターに目をやると、HR68 bpm 洞調律、SpO<sub>2</sub>96%、非観血的血圧計は駆血をしている最中だった。この時点でのパルスオキシメータ波形を図3に示す。

血圧の計測が終わるのを確認してから気管挿管を行おうと、用手換気を継続することにした。非観血的血圧計の計測が時間超過によるエラーになったため、再計測のボタンを押した。1分ほど待ったが非観血的血圧計の測定結果が出ない。SpO<sub>2</sub>も80%台まで低下したことを示していたため、やむなく気管挿管を行った。気管挿管はスムーズに成功し、胸部聴診を済ませたところでパルスオキシメータの音階がエラーになっていることに気づいた。モニターに目をやると、HR42 bpmでBPとSpO<sub>2</sub>はエラーを表示していた。この際のパルスオキシメータ波形を図4に示す。

人工呼吸器を作動させ、看護師にマンシェットの交換とパルスオキシメータ装着部位の変更を指示した。観血的動脈圧ラインを確保すべく左前腕を触診したが、橈骨動脈の拍動は触知できなかった。エフェドリンを投与しようとしリンジの準備をしている最中に、HR:30 bpmとなり、心電図でP波の消失を認めた。ショック状態と考え頸動脈を触知したが、拍動は触れなかった。無脈性電気活動(PEA)と判断し、胸骨圧迫が開始された。

## 解 説 — 18a 97% (以下同)

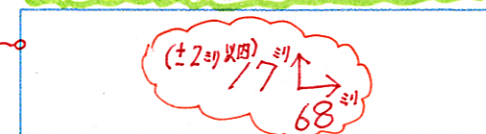
緊急手術として比較的にコモンであろう消化管穿孔を題材とした。経口摂取不可と腹膜炎による血管外漏出のため、ほとんどの症例では血管内脱水の状態が麻酔を始めざるを得ない。前負荷と後負荷のバランスを維持することが循環管理に重要であることは言うまでもないが、麻酔導入中のような短期間での劇的な変動をリアルタイムに指標化できる循環モニターは残念ながら存在しない。普段、主に酸素化の指標として用いているパルスオキシメータの波形は、実は循環モニターとしても応用できることをご存じだろうか。波形に着目することで、このような状況に陥る前に適切な対応ができるようになる可能性について提示したい。

症例ライブラリー ◆ 波形を読む

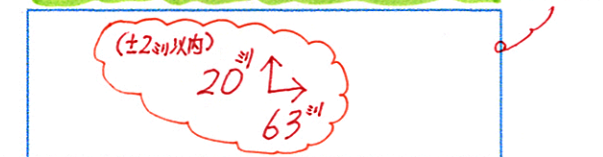
10a 新JIR

11a ロダンDB (以下同)

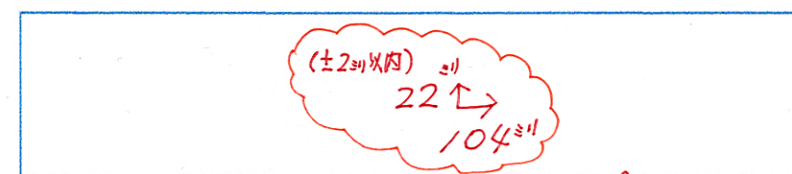
▼図1 全身麻酔導入前のパルスオキシメータ波形

0.12ミリタ  
色バタ (以下同)

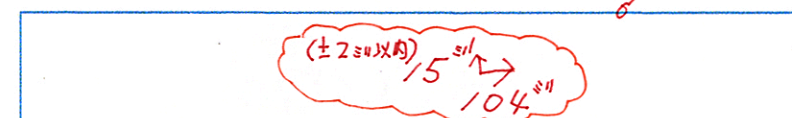
▼図2 患者意識消失時のパルスオキシメータ波形



▼図3 TOF 0となった時点でのパルスオキシメータ波形



▼図4 気管挿管終了時点でのパルスオキシメータ波形



## パルスオキシメータの測定原理

パルスオキシメータは波長660 nm付近の赤色光と940 nm付近の近赤外光の2種類の光を発光部から出し、各波長の吸光度の比率の違いから酸化ヘモグロビンの割合、すなわちSpO<sub>2</sub>を計測している。

表示されるパルスオキシメータの波形は、SpO<sub>2</sub>測定の副産物であり、本来は測定がうまく行われていることを確認するための指標として利用される。この波形は、940 nm付近の近赤外光において、酸化型および還元型ヘモグロビンの吸光度がほぼ等しいことを利用し、透過光の変動成分として表示される。測定部位(多くは手指)において変動する区画は拍動を持つ動脈であり、パルスオキシメータの波形は動脈血容積を波形として表示していることになる。通常は単位を持たないが、全体の透過光中における拍動成分の割合をパーセント表示する形式が多い。指尖部の血流が低下しているケースや人工心肺中のように定常流になっているケースでは光電容積脈波は表示されず、SpO<sub>2</sub>の算出ができなくなる。

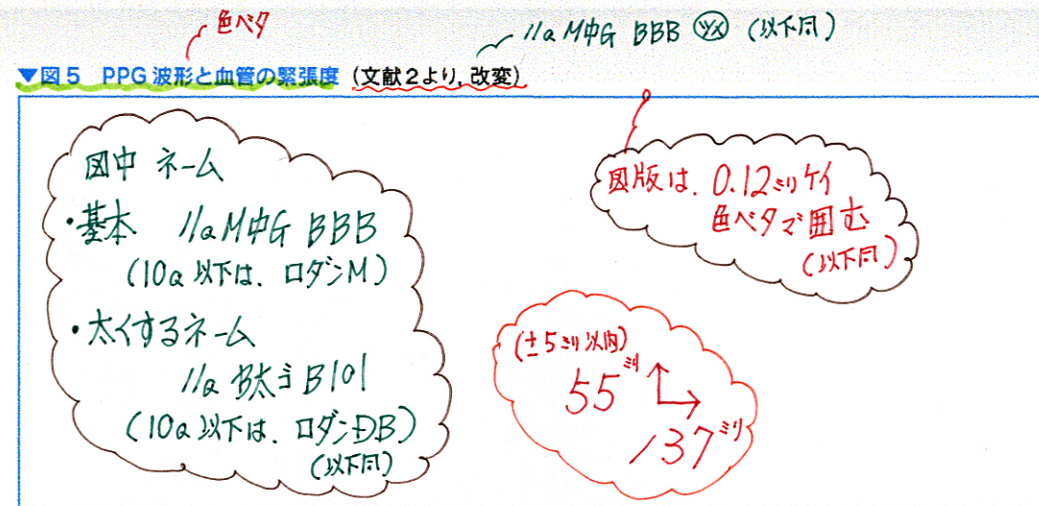
## 循環動態とパルスオキシメータ波形

観血的動脈圧波形の解析がミラー麻酔科学<sup>1)</sup>に掲載されている。PPG波形は血流を、観血的動脈圧波形は血圧を表現しているため、含んでいる情報が異なる。しかし基本的には類似した波形が表示されるため、大いに参考になる。パルスオキシメータについて参考にした論文はAnesthesia & Analgesia<sup>2)</sup>にも掲載されている。

詳細は成書に譲るが、ここまで述べてきたように、基本的にはPPG波形の振幅は血流量を表し、notchの位置は血管の緊張度を表している。これを踏まえたうえで、提示した症例を解説する。図1は麻酔導入前のPPG波形であり、図5中の高度の血管収縮を示している。腹膜炎による腹痛と精神的緊張から来る、過度の交感神経緊張状態だと推定される。このような状態から全身麻酔を導入した場合、交感神経応答が抑制されることで大きな血圧低下をきたすことが予想される。

図2は意識消失後のPPG波形であり、図5中の中等度の血管拡張を示している。振幅は図1よりも大きくなっているが、notch位置は下行脚終端にわずかに見られるかほぼ消失しており、血管が拡張し一時的に指尖部の血流が増加したことを表している。この時点ではまだ許容





範囲内であるものの、血圧が低下してきており、以降のさらなる低下を予見させる。

図3では、全体的な振幅の低下と、用手換気による胸腔内圧変化に従って、振幅が大きく変動していることが確認できる。特に吸気時には振幅が非常に小さくなっており、指尖部の血流と心拍出量が減少し始めていることが示唆される。血圧測定もエラー表示となっており、この時点ですでにショックバイタルである可能性を強く念頭に置くべきであろう。

図4に至ってはかろうじて波形らしき揺らぎが見えるものの、波形として認識ができないため、パルスオキシメータはエラー表示となっている。指尖部の血流がほぼゼロになっていることを表しており、心拍出量が高度に低下した危機的状況を示唆している。

本症例では、どの時点から血圧低下に対して介入を開始すべきかについては明確な推奨はし得ない。ただ、気管挿管後に初めてエフェドリンを準備し始めるのではタイミングが遅すぎるのではないかと。少なくとも、図3のPPG波形を見て血圧が計測不可だったのならば、橈骨動脈ないしは総頸動脈を触知しようとする行動は必要だったと筆者は考える。このように、パルスオキシメータは1心拍ごとのリアルタイムに、かつ非侵襲的に循環動態の変化を反映する機能をもっている。置かれた環境によってさまざまな数値・波形をとるため個人間での比較には適さないが、個人内では非常に簡便・鋭敏な全身麻酔中の循環モニタリングとして応用できることを覚えておいてほしい。

キーワード

パルスオキシメータ

波形解析

異常低血圧

13a 新2R

22H

(以下同)

色80% + スミ10% (以下同)

色ベタ (以下同)

1/2 M中G BBB (以下同)

1/2 太くBBB (以下同)

色ベタで囲む (以下同)

(±5%以内) 55% ↑ 137%

0.12秒以内・スミ80% (以下同)

136.5% (以下同)

さらなる学習のために

●Aoyagi T. Pulse oximetry: its invention, theory, and future. J Anesth 2003; 17: 259-66.

青柳先生は世界に先駆けて、1974年の日本生体医工学会でパルスオキシメータの基本原理解を学会発表された。今では世界中の臨床現場で必須モニターの一つとして活躍しているこのモニターの基本原理解を発見された研究者がAnesthesia誌に寄せた特別論文である。日本の麻酔科学にかかわる研究者として、一読をお勧めする。

文献

1. Jonathan M, Becky S, Atilio B, et al. Cardiovascular Monitoring. In: Grop- per MA, Cohen NH, Eriksson LI, et al, eds. Miller's Anesthesia. 10th ed. Philadelphia: Elsevier, 2025; 994-1042.

2. Tusman G, Bohm SH, Suarez-Sipmann F. Advanced uses of pulse oximetry for monitoring mechanically ventilated patients. Anesth Analg 2017; 124: 62-71.

1234 ● LISA VOL.11 NO.1 2004-1

1/2 M中G BBB (以下同)

1/2 太くBBB (以下同)

色ベタで囲む (以下同)

(±5%以内) 55% ↑ 137%

## 症例 ライブラリー

### 波形を読む

## 麻酔覚醒時の急激な血圧低下

### ■症 例

45歳の男性。身長178 cm、体重55 kg。閉塞性肥大型心筋症 (HOCM) を指摘されており、循環器内科でフォロー中であった。肝細胞癌に対して、腹腔鏡下肝臓部分切除術が施行された。術後鎮痛は腹壁の神経ブロック+経静脈患者自己調節鎮痛 (IV-PCA) とし、術中からフェンタニルを25 μg/hrで投与開始した。手術終了後に麻酔から覚醒させ、スガマデクスを投与して意識・呼吸状態に問題がないことを確認した後に抜管した。直後から観血的動脈圧モニタリングでは血圧が68/32 mmHgと急激に低下した。

12)

さて、あなたならどうする？

血圧低下の原因を推定するために、動脈圧ライン波形に注目してみよう。

### 観血的動脈圧波形の成り立ち

収縮期にはまず左室からの順行性の心拍出による急峻な立ち上がり認め、わずかに遅れて末梢からの反射波 (reflected wave) が伝わる。反射波により収縮期圧が上乗せされた後に動脈圧は低下し、大動脈弁の閉鎖や反射波によってdicrotic notchが形成され、拡張期圧が形成される (図1)。特に血管弾性が低下した高齢者では反射波の影響が大きく、収縮期ピーク圧は上昇する。

また、動脈圧波形は観察する動脈の部位によっても影響を受ける。一般的には、末梢の動脈ほど収縮期のピークは遅くなるが、反射波の影響をより受けるため収縮期圧は高くなる。拡張期圧は逆に末梢動脈では中枢動脈よりも低くなり、dicrotic notchの出現も遅くなる。しかし、平均動脈圧は測定部位によらず比較的一定に保たれることは重要である。

### ■症例経過 1

皮膚の発赤や膨疹は認めず、換気量の低下やwheezeの聴取も認めなかった。動脈圧波形は図2のとおりであった。収縮早期の立ち上がりの後に波形の落ち込みを認め、収縮後期には再度ドーム状の波形を呈する二峰性の“spike-and-dome”型の波形が観察された。

12)

低血圧の原因として最も考え得る診断は？

### さまざまな疾患に特徴的な動脈圧波形

本症例の動脈圧波形は“spike-and-dome”型と表現され、HOCMに特徴的な波形である。収縮早期には通常の立ち上がり呈したスパイク波形が認められるが、その後収縮中期には左室流出路の動的な閉塞により動脈圧が低下することで波形の落ち込みが認められ、その後収縮後期に左室流出路の狭窄が軽減して再度動脈圧の上昇が得られることにより、このような特徴的な波形が観察されることがある<sup>1)</sup>。

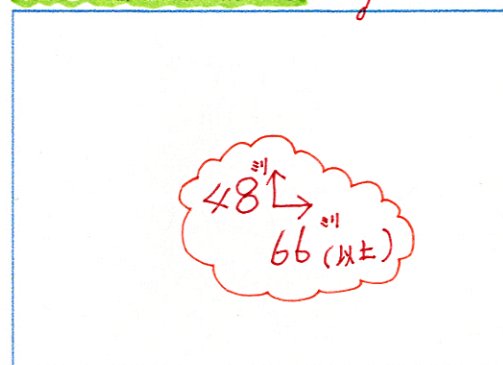
また、HOCMでは期外収縮後の最初の心拍で低い血圧を呈するBrockenbrough-Braunwald-Morrow徴候<sup>2)</sup>を認めることがある。健康心では、期外収縮後の長い不応期により細胞内カルシウムの上昇が生じて、期外収縮後の心拍では通常よりも高い血圧が観察されるが、HOCMではそのような過剰な心収縮により左室流出路狭窄が増悪し、期外収縮後の最初の心拍による血圧はむしろ低下する。

吉川 裕介  
YOSHIKAWA Yusuke

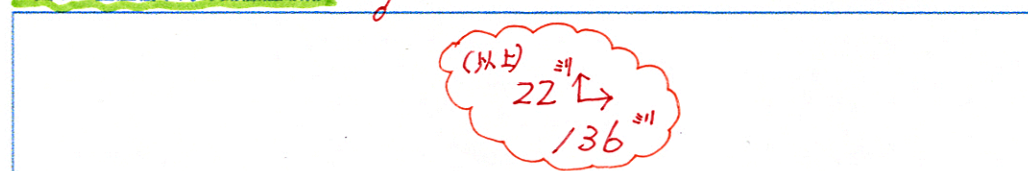
札幌医科大学医学部  
麻酔学講座



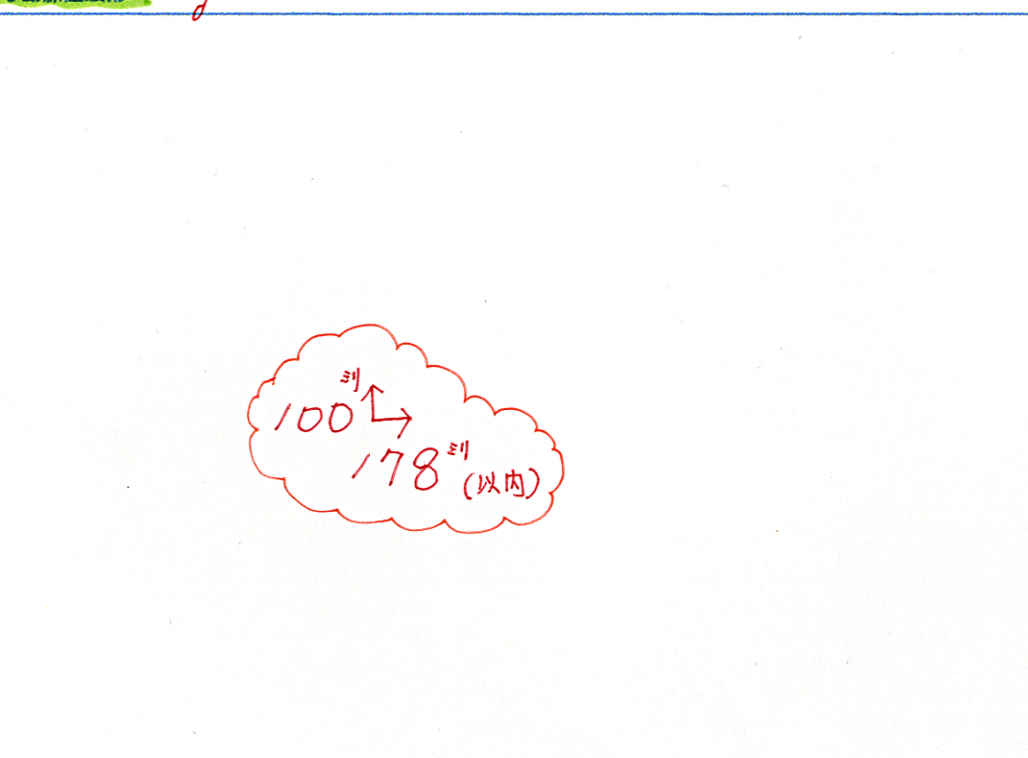
▼図1 動脈圧波形の成り立ち



▼図2 血圧低下時の動脈圧波形



▼図3 さまざまな疾患で特徴的な動脈圧波形



一方で、アナフィラキシーショックのように体血管抵抗が高度に低下している場合には、動脈壁緊張の著明な低下により dicrotic notch が不明瞭となり、動脈圧に加えて拡張期圧も急激に低下して全体として丸みを帯びたような形状となる。

そのほかの病態における特徴的な動脈圧波形の例を以下にまとめる (図3)。

13a ロダンDB (以下同)  
880% + 2220% (以下同)

◎遅脈 重症大動脈弁狭窄症で特徴的である。狭小な大動脈弁口により左室からの心拍出量が著しく制限され、動脈圧波形の収縮期の立ち上がりがゆるやかとなる。dicrotic notch は消失することもある。

◎二峰性脈 重症大動脈弁逆流症で特徴的である。大動脈弁逆流により増大した心拍出量により収縮早期に最初のピーク波形を認め、その後末梢からの反射波の影響を受けて二つ目のピーク波形が観察されることがある。加えて、重症大動脈弁逆流症では、拡張期の左室内への血液の逆流により、拡張期圧は著明に低下する。このような急峻な脈波の立ち上がり低下を呈する波形は速脈と表現される。

◎交互脈 重度の左室機能不全で特徴的である。洞調律でありながら強脈と弱脈が交互に観察される。いわゆる二段脈とはまったく異なることに注意が必要である。

◎奇脈 心タンポナーデや収縮性心膜炎で特徴的である。正常時でも観察される血圧の呼吸性変動が誇張され、自発呼吸時の吸気時に動脈圧が 10 ~ 12 mmHg 以上低下する。

#### ■症例経過 2

特徴的な動脈圧波形から HOCM による血圧低下を疑い、すみやかに経胸壁心エコー図検査を行ったところ、左室流出路に明らかな加速血流を認めた。直ちに輸液負荷とフェニレフリン投与により対処するとともに、フェンタニルの追加投与を行い十分な鎮痛を行った後に血行動態は改善し、経過観察目的に集中治療室に入室した。

#### HOCM による低血圧の誘因とそれに対する対処法

HOCM では循環血液量や心収縮力などの変化により、左室流出路狭窄の程度がダイナミックに変化し得る。一般的に、循環血液量の減少や後負荷の低下、頻脈、心筋収縮力の増強などが左室流出路狭窄を増悪させることが知られている。本症例では、抜管操作や術後の疼痛による交感神経刺激により心筋収縮力の増強や頻脈が引き起こされ、それにより左室流出路狭窄と低血圧が顕在化したものと推察された。

#### ■症例経過 3

集中治療室入室後は同様のエピソードを避けるために、十分な鎮痛に加えて 1 回拍出量変動 stroke volume variation (SVV) や脈圧変動 pulse pressure variation (PPV) をもとにした血管内容量の適正化に努め、経過は良好であった。翌日に一般病棟へ退室となった。

#### 輸液反応性の評価のための動脈圧波形

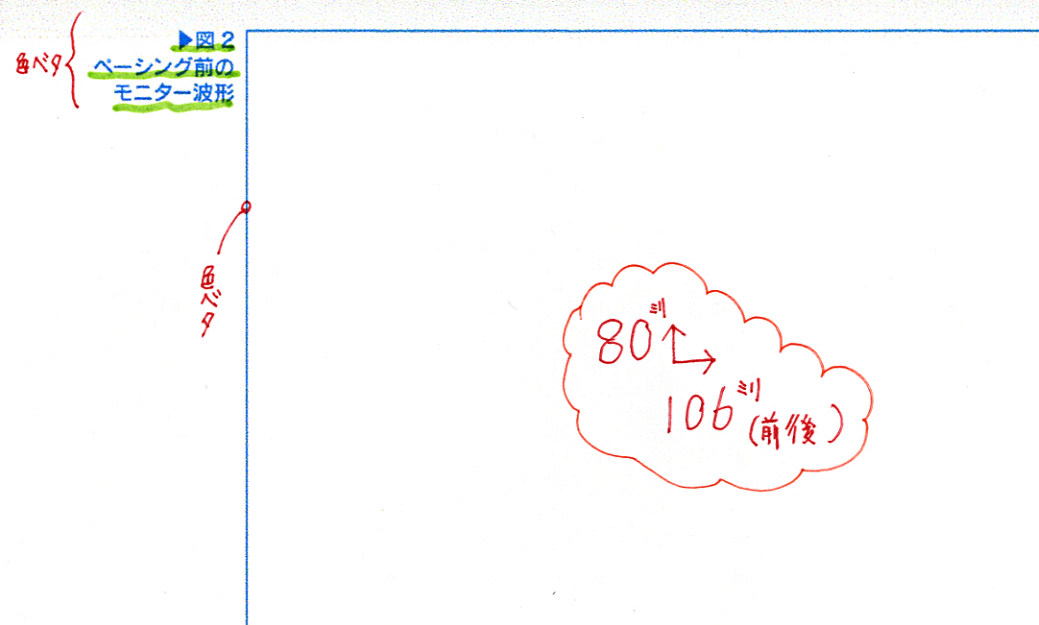
循環血液量の適正化のために輸液反応性を評価することはきわめて重要である。近年では、動脈圧波形を用いた SVV や PPV が輸液反応性の指標として有用であるとする研究が多数報告されている。最近のメタアナリシスでは、輸液反応性の指標としての SVV と PPV の曲線下面積 area under curve (AUC) は両者とも 0.87 であり、SVV と PPV は同程度に輸液反応性の指標として有用であると結論づけられている。輸液反応性の指標としての SVV と PPV のカットオフ値は研究によって異なるが、平均としてそれぞれ 12.1%, 11.5% であった<sup>3)</sup>。

筆者が最初に麻酔を教わった時代は、指導医から「A ラインの揺れをよく見ておけ」といつも言われていたものであるが、それは SVV や PPV に他ならず、近年ではそれを定量評価してより客観的な数値として日々の診療に役立てることが一般的となっている。









谷は拡張早期の心室充満と対応している。これらの構成成分は心機能や不整脈により変化をきたす。CVP 波形の a 波は sinus rhythm であれば心電図の P 波に続き、また c 波は常に心電図の R 波に続いて確認することができる。CVP は心電図の R 波の直後、CVP 波形の c 波の基部で測定する必要がある。

PAP 波形は、CVP 波形のように名前はないが、4 相からなることが知られている。第 I 相は急峻で急速な収縮期のアップストロークであり、これに第 II 相として収縮期のピークが続く。正常な PAP 波形であれば、収縮期右室圧のピークと収縮期 PAP のピークに有意な圧力差はない。第 III 相は dirotic notch で、肺動脈弁閉鎖を表し、拡張早期を意味する。この notch は常に心電図の T 波に続く。その後、第 IV 相として、拡張期を示す圧力低下のラインをみることができる。

#### ■ 症例経過 1

ペーシング前のモニター波形は図 2 のようであった。

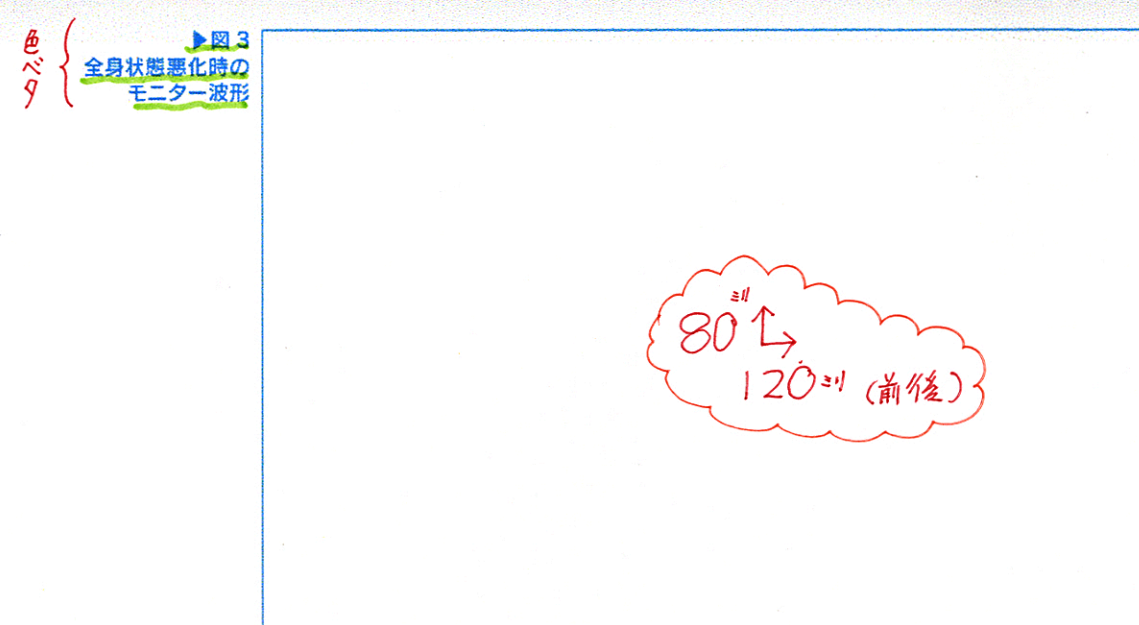
アキ

さて、どのようにすすめていく？

#### 鑑別のプロセス

波形を解釈する際には、一つの波形に注目するのではなく、そのほかのモニタリングと組み合わせて判断することが有用である。

不整脈は心電図に変化をもたらす。心電図と関連する CVP や PAP にも変化をもたらす。正常な状態では、左室等容収縮の持続時間が長いので、PAP のアップストロークは動脈圧アップストロークに先行する。このタイムラグは通常小さいので、オーバーラップしているようにも見える。しかし、左脚ブロックの場合、左室収縮が遅延するため PAP のアップストロークと動脈圧アップストロークのタイムラグが増加する。右脚ブロックの場合は逆に、動脈圧アップストロークが PAP アップストロークに先行するようになる。完全房室ブロックの場合は、収縮期に閉じた三尖弁に対する心房収縮を反映し、cannon a 波を CVP 波形で観察することができる<sup>1,2)</sup>。



本症例の CVP 波形では、完全房室ブロックを示す cannon a 波を認めている。そのため、ペースメーカの設定が A ペースであると心室収縮がペーシングに乗らず、血行動態が不安定になる可能性があり、V ペースを含んだ設定が望ましいと判断できる。

#### ■ 症例経過 2

ペーシングリードを心房、心室に留置し、設定は DDD とした。完全房室ブロックも一過性であり、血行動態は安定しており手術終了後 ICU 入室となった。入室直後は特に問題はなかったが、夜間に血圧低下し全身状態の悪化を認めた。ドレーンの排液量の著明な増加はなく、血液ガス検査でもヘモグロビン (Hb) 値の急激な低下は認めず、出血性ショックは強くは疑われない状況である。心臓の様子を確認しようとするも、開胸術後のため、経胸壁心エコーの描出不良である。そのときの CVP・PAP 波形は図 3 のとおりであった。

#### 合併症の推測

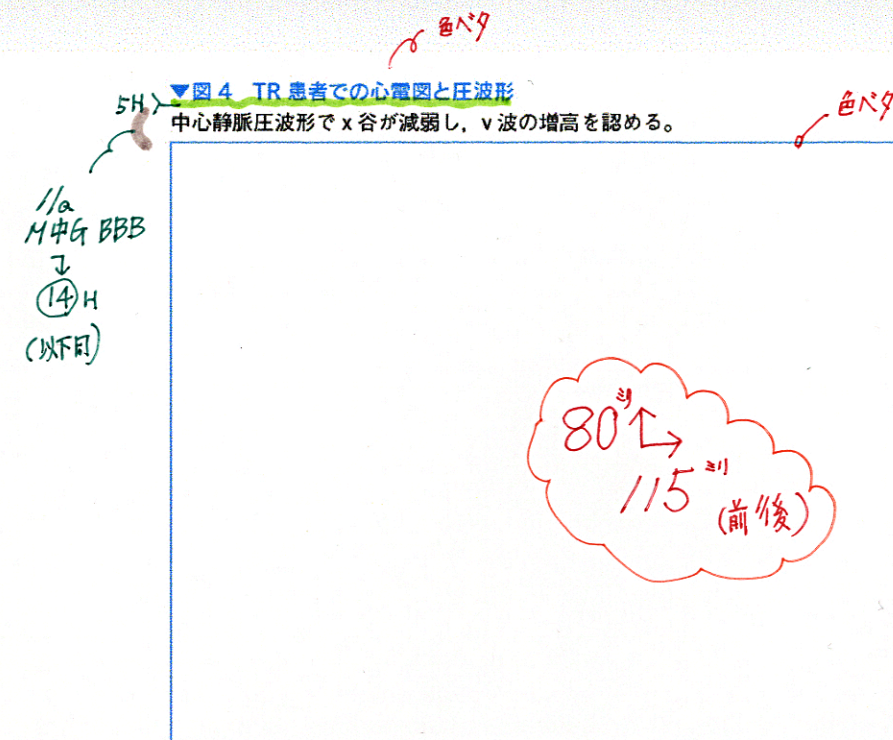
前述したように、僧帽弁形成術では僧帽弁周囲組織損傷によるさまざまな合併症や、弁形成不成功による MR 再発、僧帽弁狭窄症 (MS) 出現、SAM の出現など、多くの鑑別がある。経胸壁心エコーで弁膜症などの精査が難しいときに、CVP・PAP 波形が診断の一助となることがある。

重度の三尖弁閉鎖不全症 (TR) の場合、血液は収縮期に右室から右房へ逆流するため、CVP 波形に収縮早期に大きな v 波を観察できる (図 4)。この v 波は全収縮期であり、c 波と合流し x 谷は消失する。MR の場合は、TR が CVP 波形に及ぼす同様の影響を PAP 波形に及ぼす。すなわち、c 波の融合と x 谷の消失を伴う全収縮期の大きな v 波を観察できる。しかし、左房圧の反射が遅れて減衰するため、TR での c 波の融合と比べ、あまりはっきりとした変化ではない<sup>1,2)</sup>。

今回、CVP 波形は問題ないが、PAP 波形で全収縮期の大きな v 波を確認でき、MR が再発した可能性を疑う。本症例はその後、再開胸手術となり、術中の経食道心エコーで重度の MR を認めた。

右脚ブロック・左脚ブロックに加え、そのほかに心臓血管外科手術で起こり得る、各種疾患の波形とその特徴を図 5 にまとめた。





### ビットフォール

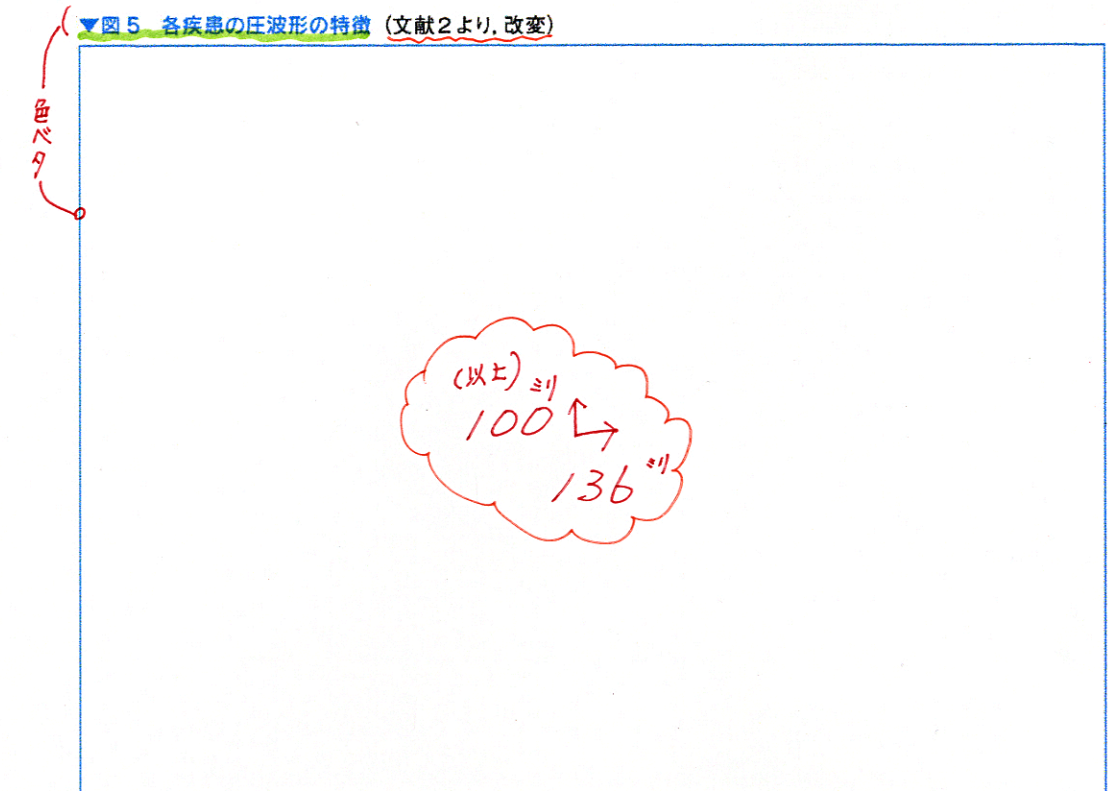
CVPおよびPAPの測定は、心機能の評価において重要な役割を果たすが、呼吸条件によって測定値が大きく影響されることに注意が必要である。これらの影響を理解し、適切な測定手法を用いることは、正確な血行動態評価において不可欠である。

まず、最も基本的な原則として、CVP、PAP、肺動脈閉塞圧 (PAWP) はすべて呼吸終末時に測定すべきである。これは、このタイミングで胸腔内圧が大気圧に最も近く、圧測定への影響が最小化されるためである<sup>3)</sup>。これは自発呼吸および陽圧換気の呼吸終末陽圧 (PEEP) いずれの場合にも適用される重要な原則である。

呼吸様式による影響は自発呼吸と陽圧換気異なる。自発呼吸中は吸気時に胸腔内圧が低下し、測定されるCVPも減少する。一方、陽圧換気中は吸気時に胸腔内圧が上昇し、CVPも上昇する。PEEPも測定値に大きな影響を与える。PEEPは心膜圧を上昇させ、左室拡張末期圧 (LVEDP) やCVPの過大評価を引き起こす可能性がある。10 cmH<sub>2</sub>O以上のPEEPが適用されている場合、CVPやPAWPは左房圧の正確な指標となり得ない。このような状況では補正が必要となり、一般的には「補正圧 (mmHg) = 測定圧 (mmHg) - [0.5 × (PEEP/1.36)]」という計算式が使用される。

PAPの測定においては、カテーテル先端の位置がきわめて重要である。肺動脈カテーテルの先端はWest's zone 3 (肺胞圧が静脈圧より低い領域) に位置している必要がある。zone 1や2では、測定値は肺静脈圧ではなく肺胞圧を反映してしまう。正しくない位置の徴候としては、呼吸周期中のPAWP変動として記録されるa波・v波の欠如、肺動脈拡張期圧がPAWPを超える状態などが挙げられる<sup>2)</sup>。

これらの要因を考慮し、適切な測定手法を用いることで、CVPとPAPの測定値をより正確に解釈し、患者の血行動態状態を適切に評価することが可能となる。単一の測定値に過度に依存するのではなく、経時的な変化や容量負荷に対する反応性を評価することも、臨床判断において重要である。



### キーワード

僧帽弁形成術  
完全房室ブロック  
僧帽弁逆流症  
中心静脈圧  
肺動脈圧

### まとめ

- 僧帽弁形成術では弁輪形成を行うため術後に刺激伝導系損傷による房室ブロックを引き起こすことがある。
- 心電図や経胸壁心エコーでの判別が困難な場合、CVP (中心静脈圧) やPAP (肺動脈圧) の波形から鑑別のヒントを得られることがある。
- 一つの測定値・測定方法に固執せず、経時的・多角的評価ができることが望ましい。

### さらなる学習のために

- 文献2は、CVP・PAP波形に関してコンパクトにまとまっており、一度目を通しておくことで理解が深まる。
- 廣田和美編・森田 潔監・麻酔科医のための周術期モニタリング・中山書店、2016。  
今回紹介したCVP・PAP以外にも麻酔科が扱う周術期モニタリングについて、測定原理や特性等が詳細にまとめられている。

### 文献

1. Mark AG, Andrew NS. 心臓手術患者のモニタリング. In: 新見能成, 加藤 剛監訳. ヘンズレー心臓手術の麻酔. 第5版. 東京: メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2020; 154-72.
2. Bootsma IT, Boerma EC, de Lange F, et al. The contemporary pulmonary artery catheter. Part 1: placement and waveform analysis. J Clin Monit Comput 2022; 36: 5-15.
3. Pittman JA, Ping JS, Mark JB. Arterial and central venous pressure monitoring. Int Anesthesiol Clin 2004; 42: 13-30.



## 症例 ライブラリー

### 波形を読む

全静脈麻酔の執刀直後に  
BISが急低下し、  
血圧と心拍数が急上昇

#### ■症 例

56歳の女性。身長155 cm、体重65 kg。左半月板損傷に対して、関節鏡下半月板縫合術が予定されている。20年前に子宮筋腫の手術を受けた際に術後悪心・嘔吐（PONV）がひどかったとの訴えがあったため、麻酔は全静脈麻酔（TIVA）による全身麻酔を予定した。

プロポフォール目標濃度調節静注（TCI）3 ng/mLとレミフェンタニル0.3 μg/kg/min、ロクロニウム50 mgで導入し、声門上器具を挿入した。麻酔深度のモニタリングとしてBISを用いた。麻酔導入後、BIS値は40～50の間を推移していた。挿管から25分後にターニケットをインフレートし、手術を開始したが、執刀直後にBIS値が30まで急激に低下し、同時に血圧100/55 mmHg、心拍数65 bpmからそれぞれ180/110 mmHg、105 bpmに上昇した。

さて、あなたならどうする？

#### 鑑別のプロセス

かつての麻酔深度理論では、血圧と心拍数を指標に、麻酔薬の濃度の上げ下げで麻酔深度を調節し、意識と侵害刺激をコントロールしていた。この旧来の考え方に従うと、本症例でみられた、BIS値が低下し麻酔深度が深い状態であるにもかかわらず、侵害刺激で血圧や心拍数が増加することは、一見、矛盾した事態が発生したといえる。しかし、今日では、麻酔薬に濃度依存性の侵害刺激抑制作用がないことが明らかになっているので<sup>1)</sup>、たとえ麻酔薬によって深い鎮静状態（麻酔深度）が得られていても、侵害刺激による血圧と心拍数上昇が発生することに何ら不思議はない。

現在の麻酔の考え方では、麻酔は鎮静と鎮痛と筋弛緩からなり、鎮静は麻酔薬によって、鎮痛は鎮痛薬や局所麻酔薬によって得るとされる<sup>2)</sup>。BIS値は麻酔薬の鎮静度を反映する指標であり、血圧や心拍数は鎮痛（侵害刺激の抑制）を反映する指標である<sup>2)</sup>。したがって、執刀直後の血圧・心拍数の上昇は、鎮痛薬による侵害刺激の抑制が不十分であったため生じたと解釈するのが妥当である。このため、本症例では、まず鎮痛が不十分であることを疑い、レミフェンタニルの増量やフェンタニルの投与といった対応が求められる。

#### なぜ BIS 値が下がったのか？

手術開始直後にBIS値が30以下に低下する原因を表1に示す。一般に、麻酔薬によって脳波の周波数が低下するとBIS値は低下し、投与量を増やしてバースト抑制が発生すると、さらにBIS値は低下する。本症例では、執刀開始直後にBIS値が30まで急激に低下した。その原因の一つとして、麻酔薬過量によるバースト抑制の出現が考えられる。TCIによる麻酔導入では、プロポフォールがポーラス投与されるが、導入直後のプロポフォールの血中濃度は個人差が大きく、バースト抑制が発生しやすい。また、高齢者<sup>3)</sup>や認知症患者でもバースト抑制が発生しやすい。

しかし、本症例ではバースト抑制ではなく、図1に示す振幅の大きいδ波（周波数0.5～4 Hz）が認められた。通常、プロポフォールや揮発性麻酔薬は、覚醒時にみられる前頭部の低振幅・速波（β波：12～25 Hz、γ波：30 Hz以上）を高振幅・徐波へと脳波を変化させ、投与量を増やすとまずα波（8～13 Hz）が出現し、さらに投与量を増すとδ波が優位となる。このことから、δ波の出現は麻酔深度が深い状態を示すといえる。ところが本症例では、δ波が

1. 麻酔薬の過剰
  - ・バースト抑制
2. バースト抑制をきたしやすい患者
  - ・高齢者
  - ・認知症
3. 逆説的覚醒 paradoxical arousal

表1  
手術開始時に  
BIS値が低下する原因

B 20%  
11a 14a BBB  
↓ (以下同)  
17 H

図1  
執刀直後に生じたδ波  
(文献6より)

(以内) 38 → 120 (以内)

執刀直後に血圧・心拍数の上昇と同時に出現し、BIS値が低下した。通常、鎮痛が不十分な状況では侵害刺激によって脳波が覚醒方向に変化するため、周波数が上がり、BIS値が上昇する。しかし、本症例でみられたように鎮痛がきわめて不十分な状態で強い侵害刺激が加わった際、逆に振幅の大きいδ波が出現することが知られている<sup>4～7)</sup>。δ波は周波数の低い成分であるため、このときはBIS値の低下をまねく。このように、本来、深い鎮静状態を示すはずのδ波が、実際には侵害刺激に対する覚醒反応として出現し、結果としてBIS値が低下する現象を逆説的覚醒 paradoxical arousal と呼ぶ<sup>4,5)</sup>。

したがって、本症例でみられた執刀直後に血圧と心拍数の増加を伴うBIS値低下は、鎮痛作用の不足に起因する逆説的覚醒が最も疑われる。

#### 必ず疑う

いつもと同じ手順で麻酔を行っているのに予想外の反応があった場合は、薬物や投与ルートの異常を疑う必要がある。本症例では、十分量のレミフェンタニルが投与されていたにもかかわらず、執刀開始とともに血圧・心拍数の増加がみられ、脳波上、δ波が発生し、BIS値が低下した。この原因は、担当の麻酔科医がレミフェンタニルを溶解する手順にミスがあったためである。具体的には、20 mLの注射器に生理食塩液をひき、2 mgのレミフェンタニルのラベルを注射器に貼った。しかし、その直後に電話連絡でほかの手術室に呼ばれ、一時その場を離れた。手術室に戻った際に、レミフェンタニルを溶解していないことを忘れて、生理食塩液のみが入った注射器をシリンジポンプにセットして麻酔導入を開始したため、レミフェンタニルがまったく投与されていない状態で手術が開始されてしまった。注射器に薬物を溶解する場合は、溶解後にラベルを添付すること、レミフェンタニルのような粉末状薬物の溶解後は、バイアルの底を上にして溶解を再確認するといった基本的な手順を遵守すべきであった。

#### ■その後の経過

執刀後に血圧が185/110 mmHgまで上昇し、心拍数が110 bpmまで上昇したため、フェンタニル0.25 mgを投与したところ、約5分後にBIS値は50にまで回復し、血圧も正常化した。その後、レミフェンタニルの溶解を忘れていたことに気づき、レミフェンタニルを0.3 μg/kg/minで開始し、術中は問題なく経過した。麻酔からの覚醒に問題なく、抜管後、病棟に帰室した。

上山 博史  
〇〇〇〇, 〇〇〇〇  
●  
関西労災病院  
麻酔科



## 対処法

### ■ 逆説的覚醒への対応 ～ 13α ログ B (MFI)

Hagihira ら<sup>6)</sup>の報告によれば、1%イソフルラン麻酔あるいは1.5%セボフルラン麻酔において3 μg/kgの少量のフェンタニル投与は執刀開始時の逆説的覚醒の脳波変化は予防可能である。さらに、これらの脳波変化が発生した場合でも、同量のフェンタニル投与で執刀前の脳波に戻ることが可能である。これらの点から、逆説的覚醒は、麻薬系鎮痛薬や局所麻酔薬の未投与、あるいはこれらの薬物の鎮痛効果のほぼ消失した状態を示唆すると考えられる。したがって、執刀開始直後や術中に逆説的覚醒が認められた場合、鎮痛薬や局所麻酔薬による鎮痛作用が消失していることを想定しなければならない。対処法は、麻薬系鎮痛薬や局所麻酔薬を投与することである。これによって脳波および血圧・心拍数の抑制が期待できる。

### ■ 侵害刺激による脳波への影響

全身麻酔下で侵害刺激が加わることで誘発される特有の脳波変化として、δ波の増大を示すデルタ覚醒以外に、β波の増加を示すベータ覚醒や、α波成分の減少を示すアルファ脱落がある<sup>5)</sup>。これらはいずれも、手術の侵害刺激に対する鎮痛作用が不十分である場合に発生する<sup>5)</sup>。こうした変化は、単独で発生するのではなく、いくつかの変化が組み合わさって発生することが多い。Kochs ら<sup>4)</sup>はイソフルラン麻酔のデルタ覚醒は、半数でα波の振幅の低下を伴っていたと報告している。Kiyama ら<sup>7)</sup>は麻薬系鎮痛薬を投与しない1.2%イソフルラン+66%亜酸化窒素麻酔において、硬膜外鎮痛を行った例では執刀直後の脳波変化はみられなかったが、硬膜外鎮痛を行わなかった例では執刀後にδ波の出現とα波の振幅の低下がみられたと報告している。一般にアルファ脱落とデルタ覚醒は麻酔薬の投与量が多い場合に発生し、ベータ覚醒は麻酔薬の投与量が少ない場合（揮発性麻酔薬では0.5～1 MAC 以下）に発生する<sup>5)</sup>。

本症例では、投与していたはずのレミフェンタニルが、溶かし忘れによってまったく投与されていない状態で手術を開始したため、逆説的覚醒が発生した。レミフェンタニルの中断は、誤薬、点滴の中断だけでなく、点滴の漏れ、静脈ルートの異常などによって、術中のどの段階でも発生する可能性がある。現在、過剰な麻酔薬投与による高齢者での術後の認知機能低下が懸念されているが、そのような中でも、特に脳波モニタリングを行っていない場合、偶発的なレミフェンタニルの中断に備え、揮発性麻酔薬や静脈麻酔薬は余裕をもって投与する必要があると考える。

## キーワード

逆説的覚醒

δ波

BIS

## ■ ■ ■ まとめ

- BIS 値だけをみるのではなく、脳波の波形を解釈できる能力を養う。
- モニターの脳波波形をフリーズし、1秒間に10回振れる波がα波、0.5～4回振れる波がδ波である。
- 鎮痛が極度に低下した状態では、侵害刺激によってδ波が誘発され、BIS 値が低下することがあり、これを逆説的覚醒 paradoxical arousal と呼ぶ。

## ■ さらなる学習のために

- 上山博史, 山中寛男, 萩平 哲. 麻酔脳波モニターを理解しよう: 第1回 脳波を読む. LiSA 2005; 12: 1052-9.
- 山中寛男, 上山博史, 萩平 哲. 麻酔脳波モニターを理解しよう: 第2回 BIS モニターの原理と限界. LiSA 2005; 12: 1168-76. 両方とも少し前の文献で中身が若干古いですが、脳波に苦手意識のある初心者にもわかりやすいように、研修医と指導医の会話形式で「脳波の読み方」をわかりやすく解説している。手前味噌ながら、平易な解説を心がけた文献である。

## ■ 文 献

1. Zbinden A, Petersen-Felix S, Thomson D. Anesthetic depth defined using multiple noxious stimuli during isoflurane/oxygen anesthesia. II. Hemodynamic responses. Anesthesiology 1994; 80: 261-7.
2. 上山博史. 第1章 現代の麻酔の概念の理解を目指す 1. バランス麻酔. レジデントノート 2013; 15: 768-77.
3. Schwerin S, Schneider G, Kreuzer P, et al. Impact of age on the occurrence of processed electroencephalographic burst suppression. Anesth Analg 2024; 139: 1027-37.
4. Kochs E, Bischoff P, Pichlmeier U, et al. Surgical stimulation induces changes in brain electrical activity during isoflurane/nitrous oxide anesthesia. A topographic electroencephalographic analysis. Anesthesiology 1994; 80: 1026-34.
5. Garcia PS, Kreuzer M, Hight D, et al. Effects of noxious stimulation on the electroencephalogram during general anaesthesia: a narrative review and approach to analgesic titration. Br J Anaesth 2021; 126: 445-57.
6. Hagihira S, Takashina M, Mori T, et al. Electroencephalographic bicoherence is sensitive to noxious stimuli during isoflurane or sevoflurane anesthesia. Anesthesiology 2004; 100: 818-25.
7. Kiyama S, Takeda J. Effect of extradural analgesia on the paradoxical arousal response of the electroencephalogram. Br J Anaesth 1997; 79: 750-3.

11 1/2 A.D.