

小児心臓麻酔の理論と実際

木村 聡^{1,2} 金澤 伴幸^{1,3}清水 一好¹ 岩崎 達雄^{1,3}¹岡山大学病院 麻酔科蘇生科²岡山大学病院 医療情報部³岡山大学病院 小児麻酔科

はじめに

小児心臓麻酔は、小児麻酔と心臓麻酔の両方の知識が要求され、比較的難易度の高い麻酔の一つである。また、個々の症例のバリエーションが大きく予備能の少ない患者が多いことから、経験やその場の素早い確な状況判断が患者予後を改善することが少なくなく、「エビデンス」や「スタンダード」とは比較的距離を置く領域でもある。今回は、臨床的な視点に可能な限り昨今の研究結果を加え、小児心臓麻酔について総説する。

1. モニタリング

■ ライン

先天性心疾患の麻酔管理のためには、可能な限り太い静脈ライン（未熟児で22 Gまたは24 G）を確保する。小さな患児の動脈圧ライン挿入部位

キーワード：小児，先天性心疾患，心臓麻酔，エビデンス

Review

Clinical Practice and Evidence of Cardiac Anesthesia in Pediatric Patients with Congenital Heart Disease

Satoshi KIMURA^{1,2}, Tomoyuki KANAZAWA^{1,3}, Kazuyoshi SHIMIZU¹ and Tatsuo IWASAKI^{1,3}

(¹Department of Anesthesiology and Resuscitology, Okayama University Hospital, ²Department of Medical Informatics, Okayama University Hospital, ³Department of Pediatric Anesthesiology, Okayama University Hospital)

〒700-8558 岡山市北区鹿田町 2-5-1

岡山大学病院 麻酔科蘇生科・医療情報部

は、橈骨動脈や大腿動脈が選択される。上腕動脈は前腕や末梢へ主に血液を供給し、側副血行路が乏しいことから、血栓や虚血性変化による合併症の危険性を鑑み動脈の挿入部位として歴史的に避けられてきた。しかし、その合併症の頻度や重症度が他の部位と比べて明らかに多いかはわかっていない^{1,2)}。右上肢の血圧は頭部の血圧のモニタリングとしても用いられるため、Norwood手術や選択的脳灌流（isolated cerebral perfusion：ICP）などで腕頭動脈からの送血が必要な手術、左鎖骨下動脈が遮断される可能性がある手術では、右上肢に動脈圧ラインを確保する。また、Blalock-Taussing シヤント（BTS）造設予定、または既にBTSが留置されている患者では、その逆側の upper 肢に動脈圧ラインを留置するか、同側の場合には平均血圧が低下していることを考慮に入れる必要がある。大動脈縮窄症など上下肢の圧較差のモニタリングを要する疾患や術式の場合には、上下肢にそれぞれ動脈圧ラインを挿入する。

中心静脈カテーテルは、右内頸静脈を選択することが多いが、モニタリングしたい圧と合併症（特に血栓）のリスクを常に考える必要がある。例えば、Glenn手術やFontan手術では上大静脈の圧は肺動脈圧のモニタリングとして有用であるが、血栓形成による還流障害は致命的である。細いカテーテルの使用、太い静脈の選択、大腿静脈や術野からの心房ラインの使用も考慮し、可能な限り短期間の留置を心がける。

中心静脈カテーテル先端が上大静脈に位置して

いる場合、中心静脈血酸素飽和度 (ScvO₂) を評価できるというメリットもある。混合静脈血 (SvO₂) は静脈血の全てが完全に混和する部位での酸素飽和度であるため、理論的には上大静脈や下大静脈だけでなく、冠静脈洞からの静脈血も合流した後の血液酸素飽和度のことである。しかし、心内シャントがある先天性心疾患では、冠静脈洞からの静脈血だけでなくシャントを介した動脈血が流入することがあり、本当の SvO₂ を知ることができない。そのため、ScvO₂ で SvO₂ を代用することで、酸素の需要 (VO₂) と供給 (DO₂) のバランスをモニタリングすることがある。例えば、「(SaO₂ - SvO₂) / SaO₂」(SaO₂ : 動脈血酸素飽和度) は、酸素摂取率 (Oxygen extraction ratio : O₂ER) として扱うことができ、循環動態を把握する有用な指標である。酸素の需要と供給の比 (VO₂/DO₂) を示しており、1/4~1/3 を上回ると循環動態としての余力がなくなり、1/2 を超えてくると critical DO₂ 域となり組織低酸素と嫌気性代謝により乳酸が上昇してくる³⁾。また、動脈血酸素飽和度較差 (SaO₂ - SvO₂) が 35% 以上である場合は、循環が十分でない可能性を示唆している^{3,4)}。

2 体 温

成人の心臓手術は軽度低体温や正常体温で施行される傾向にあるが、多くの小児や新生児の心臓手術では、未だに低体温や超低体温循環停止 (deep hypothermic cardiac arrest : DHCA) が用いられている。これは、低流量や循環停止を要する複雑な手術において、酸素供給不全に対する脳をはじめとした臓器保護を目的としている。そのため、小児心臓麻酔では代謝に深く関与する体温のモニタリングも重要である。小児で肺動脈カテーテルを挿入することは殆どなく、中枢温として咽頭温と直腸温や膀胱温をモニタリングする。咽頭温は脳に近く、特に復温時の脳高体温による神経障害を防ぐために重要である^{5,6)}。また、末梢温として皮膚温をモニタリングする。低心拍出

量状態では交感神経系の亢進により末梢血管が収縮し、中枢温と末梢温の差が拡大すると言われている^{7,8)}。しかし、末梢温には室温や加温器、モニタリング部位などさまざまな因子が関与すると考えられ、中枢温と末梢温の較差 (core peripheral temperature gradient : CPTG) の単一マーカーとしての有用性には疑問もある^{9,10)}。

3 近赤外線分光器

小児心臓手術後の神経学的合併症の発生率は 2~25% と高く¹¹⁾、非侵襲的な連続モニタリングである近赤外線分光法 (near-infrared spectroscopy : NIRS) を用いて、周術期の脳組織における酸素供給の評価を行う。臨床使用可能な NIRS デバイスは幾つか存在するが、それぞれ発光器やセンサー、動静脈の比率、アルゴリズムが異なる。また、成人と小児では光伝搬と光学的な性質が異なる¹²⁾ ため、成人用センサーで代用するのではなく、適切なセンサーを選択する必要がある¹³⁾。

脳酸素飽和度 (ScO₂) の正常値は対象患者やデバイスによって異なるが、先天性心疾患患者では低いことが多い¹⁴⁾。ScO₂ は脳の酸素バランスを表していると考えられるが、脳の酸素供給量や酸素消費量を直接測定しているわけではない。「ScO₂ < 60%, 左右差出現, 術中の低下」に対して介入すべきとの報告もある¹⁵⁾ が、原疾患やデバイスによって絶対値は異なることに加え、介入によって改善を得られないこともあり¹⁶⁾、その解釈と介入については今後に期待される。

4 経食道心エコー

経食道心エコー (transesophageal echocardiography : TEE) は、術前診断の修正や人工心肺の再導入など、10% 以上の症例で術式やその後の管理に影響を与えると報告されており¹⁷⁾、小児の心臓麻酔においても非常に重要なモニタリングの一つである。一般的に、気管食道瘻、食道閉鎖、消化管穿孔、消化管出血、気道トラブルでは禁忌とされる¹⁸⁾。また、食道穿孔といった重大な

合併症も起こし得るので、不必要で過度な操作を避け、必要に応じて経食道ではなく術野からの評価に変更するなどの柔軟な対応が望ましい。

小児、特に新生児など体格の小さな患者では、TEEプローブ挿入による気道や循環動態の変化に注意が必要である。例えば、肺静脈還流異常症のある患者では、肺静脈合流部がプローブによって圧迫され、血行動態が大きく崩れることがあり、胸骨切開後の挿入が安全である。異所性右鎖骨下動脈のある患者では、右鎖骨下動脈が左鎖骨下動脈分枝より遠位の下行大動脈から分枝し食道の後面を走行することがあり、右上肢の動脈圧ラインではプローブ操作により正確なモニタリングができない可能性がある。血管輪のある患者では、「輪 (ring)」の中に気管と食道があり、プローブ挿入により気管狭窄を生じる可能性があり、不必要に挿入すべきではない。全ての症例において、プローブ挿入前後の血行動態や最大気道内圧の変化に注意すべきである。

2. 麻酔管理

Ⅰ 麻酔薬

揮発性麻酔薬は、心収縮力を用量依存的に抑制する¹⁹⁾ため、術前より心収縮力が低下している患者では注意を要する。また、揮発性麻酔薬は体血管抵抗を用量依存的に低下させる²⁰⁾ため、麻酔中の揮発性麻酔薬を血管拡張薬として用いる小児心臓麻酔科医も少なくない。肺血管抵抗も低下させると考えられているが、心房中隔欠損症や心室中隔欠損症患者において、セボフルランやイソフルランにより Qp/Qs (Qp: 肺血流量, Qs: 体血流量) に変化がなかったとする報告²¹⁾もあることから、体血管抵抗と肺血管抵抗のどちらか一方への効果を期待することは難しいと考えられる。ミダゾラムは、揮発性麻酔薬による心筋抑制作用に耐えられないと考えられる患者に対して、低用量の揮発性麻酔薬の代わりに鎮静薬として用いられる。

フェンタニルなどの麻薬は心機能に与える影響が小さいと言われており²²⁾、50～75 mcg/kg といったフェンタニル単剤でのストレス反応抑制が小児心臓手術に用いられてきた²³⁾。レミフェンタニルは、麻薬中心の麻酔と血行動態の安定を目的とした際に有効であり、心臓カテーテル手技など短時間の麻酔に用いられる²⁴⁾。最近では、心臓外科術後早期抜管も視野に入れ、1～2 mcg/kg 以下のフェンタニルにレミフェンタニルを含めた麻酔も行われている²⁵⁾。

プロポフォールによる心筋収縮力抑制作用は小さい^{26,27)}が、体血管抵抗を低下させることにより血圧は低下する²⁸⁾。肺血管抵抗に対する作用は小さく、Qp/Qs を低下させ得る²⁸⁾。また、静脈の容量血管を拡張させる²⁹⁾ため、心機能の低下した患者や左室流出路狭窄のある患者での使用は推奨されない。小児に対しては、長期投与による代謝性アシドーシスと心筋障害が問題となるため、48時間以上や高用量 (4 mg/kg/h) の使用は避けるべきである³⁰⁾。

ケタミンは、交感神経系を刺激することで心拍数と血圧を上昇させ、予備能のある患者では心収縮力も保たれる。しかし、既に交感神経系が最大限反応している状況や、内因性・外因性カテコラミンに曝露されβ受容体のダウンレギュレーションを伴った心機能障害を有する患者では、心筋抑制作用³¹⁾が表出する。また、肺血管抵抗と体血管抵抗とのバランスや Qp/Qs は大きく変化させない³²⁾。

筋弛緩薬としては、迷走神経遮断・交感神経刺激作用により心拍数が保たれるパンクロニウムが小児心臓麻酔に用いられてきたが、日本では現在使用することができない。そのため、心血管系への作用があまりないロクロニウムやベクロニウムが用いられる。

実際の現場では、このようなそれぞれの麻酔薬の特徴を理解した上で、患者の病態に応じた薬剤を選択する必要がある。例えば、左室流出路狭窄のある患者では、頻脈や心収縮力の増強は避け、

前負荷と後負荷を維持する必要がある、プロポフォルのボラス投与や高濃度の揮発性麻酔薬の使用は相対的禁忌となる。

2 気管チューブの選択と固定

以前は、粘膜傷害と声門下狭窄を危惧し、8歳未満の患者に対してはカフなし気管チューブの使用が推奨されていた。しかし、カフなし気管チューブの場合、周術期における粘膜浮腫や肺コンプライアンス、肺血流の変化は、周囲のリーク量を変化させ、サイズ変更を余儀無くされることがある。また、カフ付きとカフなし気管チューブで気道関連合併症に差はないとも言われている³³⁾。一方、カフ付き気管チューブのデメリットとしては、同じ内径のカフなし気管チューブと比較し外径が大きく、小さいサイズを使用することによる気道抵抗の増加が挙げられる。内径8.0 mmを7.5 mmに変更すると抵抗は29%増加するが、3.5 mmを3.0 mmに変更すると抵抗は85%増加する。近年、低い圧で気道をしっかりと密閉できるlow-pressure high-volumeのマイクロカフと呼ばれるカフ付き気管内チューブが開発され、その外径はカフなしチューブの外径と近くなった。そのため、最近の専門家はカフ付き気管チューブの使用を推奨している³⁴⁾。

小児麻酔では経口挿管が一般的であるが、小児心臓麻酔では経口挿管のデメリットを考えなければならない。小児心臓麻酔中にTEEを用いることが多いが、新生児では気管チューブ先端が声門下3 cm程度であり、経口挿管ではTEEプローブ操作により事故抜管や片肺挿管の危険がある。また、経口挿管では気管チューブをテープで頬に固定することが一般的であるが、小児の皮膚は弾力性が高く、体動による気管チューブの位置変化は大きい。術後や集中治療室での長期の挿管人工呼吸管理となると、事故抜管や片肺挿管、喉頭浮腫の原因ともなる。一方、経鼻挿管では出血や（小児では少ないが）副鼻腔炎が問題となる。一般的には経口挿管の方が素早く容易であることか

ら、迅速導入では経口挿管が好まれ、必要に応じて経鼻挿管に変更する。経鼻挿管の前に経口挿管をすることで、リークをチェックし適切なチューブサイズを選択することもできる。

3 呼吸器

一回換気量と駆動圧（driving pressure）を抑え、肺の虚脱を防ぐために呼吸終末陽圧（positive end-expiratory pressure：PEEP）を用いる肺保護換気戦略の有効性が成人領域で示され、小児にもその適用が推奨されている³⁵⁾。基本的には術中を含めた周術期にも適用されると考えられるが、先天性心疾患患者においては肺血管抵抗と呼吸との関係には注意する必要がある。肺胞酸素分圧の低下や低酸素血症、高二酸化炭素血症、アシドーシスは、肺血管を収縮させ肺血管抵抗を上昇させる。逆に、高濃度酸素の吸入や過換気による低二酸化炭素血症は、肺血管を拡張させ肺血管抵抗を低下させる。自発呼吸は陰圧呼吸であるが、麻酔中の人工呼吸は陽圧呼吸となるため肺の毛細血管を圧迫し、肺血管抵抗を上昇させる³⁶⁾。また、肺容量が小さいと肺胞毛細血管の虚脱と低酸素性肺血管収縮により肺血管抵抗は上昇するが、過膨張でも肺血管を圧迫し肺血管抵抗は上昇する。肺容量と肺血管抵抗の関係はU字を描き、機能的残気量で肺血管抵抗は最も低くなる³⁶⁾。そのため、PEEPは無気肺を予防し肺血管抵抗を低下させる可能性があるが、機能的残気量よりも高いと肺血管抵抗は上昇する³⁷⁾。

4 循環

成人と同様、小児の一回拍出量も前負荷・後負荷・収縮能・拡張能に依存する。しかし、小児の循環血液量は絶対的に少ない。例えば、新生児の循環血液量が85 mL/kgと言われ、成人の70 mL/kgと比較し体重あたりでは多いが、体重が3 kgの新生児では250 mL程度しか存在しない。そのため、術中出血や人工心肺の送脱血管留置時の血液吸引など、たった30 mLの出血でも

前負荷が大きく低下し、5 mL 程度しかない一回拍出量は低下する。また、小児の心筋コンプライアンスは低く、前負荷の増加による一回拍出量の増加には限度がある。

収縮力に関しては、小児、特に新生児では、電氣的興奮を筋収縮に変換する興奮・収縮連関 (excitation-contraction coupling) のために必要なカルシウムに関する機能が未熟のため、イオン化カルシウム低下による心筋収縮力低下が起きやすい³⁸⁾。そのため、特に新生児では血中のイオン化カルシウム濃度の維持に留意する必要がある。輸血時のクエン酸中毒にも気をつける。また、交感神経系の発達が未熟で β 受容体が少ないと言われており、心収縮力の低下に関与する。

このように、一回拍出量に関しては成人との相違点があるため、小児の心拍出量は心拍数に大きく依存することになる。Fontan 循環や弁狭窄疾患のように拡張期時間が必要な患者では徐脈傾向とする場合もあるが、一回拍出量の限られた患者では心拍数を増加させることは心拍出量を増加させる有効な手段であり、小児心臓麻酔では一時的ペースメーカーによる心拍数の調整が頻繁に行われる。

5 輸液・電解質

低張液と等張液を比較した複数のランダム化比較試験で、小児の低ナトリウム血症予防に等張液が有効であるとされ³⁹⁻⁴¹⁾、小児の輸液には等張液が推奨されている⁴²⁾。また、新生児の心筋グリコーゲンは増加しているが、肝臓グリコーゲンは少なく、血糖を正常レベルに維持するために新生児早期ではグルコースを投与することが必要となる。海外には 5% だけでなく 10% のブドウ糖を含んだ細胞外液が市販されているが、日本には 10% のブドウ糖を含んだ低張液や 5% の糖濃度の等張液しか存在しない。そのため、必要に応じてナトリウムやブドウ糖を輸液製剤に混注する必要がある。

輸液に関しては、ナトリウム濃度だけでなく、

クロール濃度にも注意すべきである。成人だけでなく、小児においても 0.9% 生理食塩水の投与によりアシドーシスとなるため⁴³⁾、リンゲル液を使用する。アルブミン製剤のクロール濃度はリンゲル液のクロール濃度よりも高いことが多く、反復投与により高クロール性代謝性アシドーシスを引き起こす危険がある。成人においては血清ナトリウム濃度と血清クロール濃度の差が予後と関連しているとの報告もあり⁴⁴⁾、小児心臓麻酔領域での今後の研究が待たれる。

3. 人工心肺中の管理

1 血液希釈

歴史的には多くの施設で輸血を避けるため、人工心肺中の血液希釈が行われてきた。しかし、過度な血液希釈は神経学的予後悪化と関連したというランダム化比較試験⁴⁵⁾が発表されて以来、人工心肺中の最適なヘマトクリット値については議論中である。これまでの研究からは、ヘマトクリット値 25% 以上を維持することが推奨される^{46,47)}が、年齢やチアノーゼの有無だけでなく、その他の人工心肺に関わる設定値にも目標値は影響される可能性がある。

2 灌流圧と血液流量

新生児では、血管の反応性の欠如や短絡路の存在によって灌流圧が低くなりやすい。灌流圧 (平均血圧-中心静脈圧) の目標は、新生児で 30~40 mmHg、2 歳以降では 40~50 mmHg が一つの目安である¹⁸⁾。

基本的に人工心肺中の血流量は体重や体表面積を元に計算されるが、代謝率の高い新生児や回路内のシャント、側副血行路の存在によっては高血液流量が必要となる。また、個々の症例によって流量を調節すべきである。例えば、10 kg までは 150 mL/kg/min (10 kg 以上は 2.4 L/min/m²) を基準とし、低体温による代謝抑制下では 80~100 mL/kg/min、複雑な心内修復では術野の視

野確保のための超低体温下で 25～50 mL/kg/min まで流量を低下させることもある。体表面積を元に流量を調節する場合は、新生児では 2.6～3.2 L/min/m²、乳児で 2.4～2.6 L/min/m² が推奨される¹⁸⁾。

3 血 糖

血糖 80～110 mg/dL を目標とした厳密な血糖コントロールは、感染症や死亡率、臓器不全といった予後を改善せず⁴⁸⁾、そのような血糖値は術後合併症の増加と関連する可能性もある⁴⁹⁾。また、危惧される高血糖と神経発達との関連は示されなかったが、人工心肺離脱後の血糖が低い方が術後の痙攣と関連しており、乳児では成人のように高血糖による乳酸の蓄積が神経学的悪影響を及ぼさず、軽度の低血糖でさえ脳傷害を引き起こす可能性がある⁵⁰⁾。小児心臓手術の周術期管理においては、軽度の低血糖も見逃さず、高血糖には比較的寛容でよいのかもしれない。

4 ステロイド

ステロイドは、主に二つの理由で投与される。一つは高用量の強心薬の使用を減らす目的、もう一つは炎症反応の抑制である。人工心肺を用いた手術の場合、血液が人工心肺の回路に曝されることで、全身性に炎症反応が励起される。白血球や血小板、凝固カスケードの活性化、血管内皮の透過性増加、血管拡張、血管内容量低下を介し、臓器不全や予後悪化と関係する。しかし、ステロイドによる予後改善効果は不明である。2010 年の米国大規模データベース研究でステロイドの優位性は示されず⁵¹⁾、2020 年の小児心臓手術を対象としたメタ解析では、ステロイドの予防的投与は人工呼吸期間を短縮させる可能性はあるが、死亡率や集中治療室滞在日数には影響しないと結論付けている⁵²⁾。

5 残存病変

残存病変は生存日数を含めた予後悪化と関連す

る⁵³⁾ ため、人工心肺離脱時の残存病変のチェックは重要である。TEE や術野からの心エコーを用い、小児循環器科医やライセンスのある専門家による評価が望ましい。また、心内シャントの閉鎖術であれば Fick の原理を用いて Qp/Qs を計算することができる。Fick の原理とは、『ある器官が物質を摂取（または供給）するとき、その器官が一定時間内に摂取（または供給）する物質の量を、その器官への流入血液の物質の濃度と流出血液の物質の濃度の差で割ることにより、血流量を計算できる』というものであり、この原理を用いると、Qp/Qs は $\frac{(SaO_2 - SvO_2)}{(SpvO_2 - SpaO_2)}$ (SpvO₂: 肺静脈血酸素飽和度, SpaO₂: 肺動脈血酸素飽和度) に近似する。例えば、心室中隔欠損孔の閉鎖術を施行し、人工心肺離脱後の TEE で残存病変がみられた場合、術野で肺動脈血 (ex. SpaO₂ 80%) を、麻酔科側から動脈血 (ex. SaO₂ 100%) と中心静脈血 (ex. ScvO₂ 65%) を採取し、肺静脈血の酸素飽和度を 100% と仮定できれば、 $Qp/Qs \div (1.0 - 0.65) / (1.0 - 0.8) = 1.75$ と計算できる。

4. 人工心肺離脱後

1 抜 管

成人だけでなく、小児の開心術後の早期抜管は一つのトピックである。2010 年のメタ解析では、早期抜管（手術室または集中治療室入室後 6 時間以内の抜管）の安全性が提唱され⁵⁴⁾、さまざまな施設で早期抜管が可能となることが示されている⁵⁵⁾。一般的には、鎮静剤使用量を減らし人工呼吸期間を短縮することによる神経学的予後や肺合併症、リハビリ、コスト削減といったメリットがある。また、Glenn 術後や Fontan 術後患者では、肺血流量は低い肺血管抵抗に依存しているため、早期抜管による陰圧呼吸により血行動態の安定化や予後改善が得られる可能性がある⁵⁶⁻⁵⁸⁾。一方で、早期抜管には再挿管のリスクがあり、予後不良因子ともなり得る⁵⁹⁾。

早期抜管の適応や閾値はそれぞれの施設によって大きく異なるが、Risk Adjustment for Congenital Heart Surgery (RACHS) scoreに代表される手術の難易度は、人工心肺時間や出血、浮腫にも関係するため、早期抜管の決定に大きく関与する²⁵⁾。また、年齢も大切な因子であり、生後6か月以上であれば早期抜管を考慮できる⁶⁰⁾。染色体異常自体は早期抜管の禁忌とはならないが、気道確保困難や気道閉塞のリスクとの関連が示されている疾患(ex. 21トリソミー)では注意を要する。術前の肺高血圧の存在は、さまざまな周術期合併症と関連することはよく知られており、早期抜管を躊躇する要因となる。

近年では、早期抜管の中でも手術室抜管にも注目が集まっている⁶¹⁾。施設により抜管するタイミングや場所(手術室または集中治療室)はさまざまであり、手術室抜管を積極的に行っている施設では手術室抜管後の再挿管率が低いとの報告もある⁶²⁾。しかし、その差は小さく、総呼吸補助日数や病院滞在日数にも差を認めない⁶²⁾。それぞれの施設にはさまざまな背景を元に作られたシステムがあり、トピックに飛びつき安易に真似をするのではなく、全体を見通す力が必要である。

2 低心拍出量症候群

低心拍出量症候群(low cardiac output syndrome: LCOS)は、先天性心疾患の開心術後合併症の一つである。典型的には術後6~18時間後に発生し⁶³⁾、周術期の死亡を含め予後と関連する⁶⁴⁾。

心拍出量を増やす方法に関しては、まずは前述のように、前負荷・後負荷・収縮能・拡張能と、心拍数に留意して最適化を目指す。陽性変力作用をもつ薬剤としては、カテコラミンとPDEⅢ阻害剤がよく知られている。これらはcAMPの増加を介して細胞内カルシウム濃度を上昇させることで、陽性変力作用を発揮する。しかし、カテコラミンは心筋や全身の酸素消費量を増加させることや、長期間の使用による心筋の β 受容体の脱感作が危惧される¹⁸⁾。PDEⅢ阻害薬であるミル

リノンは、開心術後の小児に対し、PRIMA-CORP trialで高用量(0.75 mcg/kg/min)の予防的投与の有用性が示され⁶⁵⁾、心筋の酸素消費量にも影響を与えないとされる⁶⁶⁾。また、小児、特に新生児の心筋や血管平滑筋は細胞外カルシウム濃度に依存しており、カルシウム製剤は陽性変力作用と血管収縮作用を持つ⁶⁷⁾。しかし、カルシウム濃度の上昇は細胞死や虚血再灌流傷害に悪影響を及ぼす可能性があり、過度な投与は避けるべきである³⁸⁾。LCOSに対する薬剤の選択にガイドラインは存在せず、施設によって方針は大きく異なっている⁶⁸⁾。欧州ではミルリノンを第一選択とする施設が多いが、その投与速度はPRIMA-CORP trialの投与速度より少ない⁶⁸⁾。体血管抵抗上昇性のLCOSに対してはエピネフリンの追加、肺血管抵抗上昇性のLCOSに対しては一酸化窒素吸入の追加が好まれている⁶⁸⁾ようであるが、これらはあくまで多施設の調査であり、推奨ではない。

動脈血酸素飽和度や心拍出量増加に限界のある先天性心疾患患者では、赤血球輸血によりヘモグロビン濃度を上昇させることで、酸素供給量増加が目論まれてきた。しかし、一般的な小児心臓外科術後患者⁶⁹⁾だけでなく、Glenn術後やFontan術後⁷⁰⁾、乳児⁷¹⁾、Norwood術後^{72,73)}を対象としても、積極的な赤血球輸血に否定的な研究が相次いでおり、以前考えられていたほど高いヘモグロビン濃度は必要ではない。

開心術後の炎症反応やカテコラミン、体動により酸素消費量は増加する¹⁸⁾。そのため、LCOSでは、酸素供給量を増やすと同時に、酸素需要量を減らす努力も必要である。中枢温の上昇は酸素消費量増加と関連すると考えられているため^{74,75)}、解熱やクーリングが難治性LCOSに対してしばしば行われる⁷⁶⁾。また、筋弛緩薬による筋収縮の抑制は代謝率を低下させ全身性の酸素消費量を低下させる⁷⁷⁾ため、LCOSで酸素供給量増加が見込めない患者に対しては、筋弛緩薬の使用を含めた人工呼吸管理を必要とする場合がある。

3 肺高血圧クライシス

先天性心疾患術後には、何らかの刺激や要因により肺高血圧症が急激に悪化し、心停止を引き起こす肺高血圧クライシスを発症することがある。特に房室中隔欠損症、総動脈幹症、総肺静脈還流異常症、大血管転位症、左心低形成症候群、心室中隔欠損症、肺静脈狭窄症、僧帽弁狭窄症のある患者では注意を要する^{78,79)}。肺血管抵抗の急激な増加（右室の後負荷増加）を契機とし、「① 右心不全 ⇒ ② 右室拡張末期圧上昇と右室壁の伸展 ⇒ ③ 心室中隔の左方シフト ⇒ ④ 左室圧迫と左室収縮能低下 ⇒ ⑤ 心拍出量低下と血圧低下 ⇒ ⑥ 冠血流減少 ⇒ ① 右心不全」の悪循環に陥る¹⁸⁾。また、上記のスパイラルに入り込むイベントであれば何でも肺高血圧クライシスの原因となりうるが、特に、低酸素血症や高二酸化炭素血症、アシドーシス、気管への刺激、体血圧低下には気をつける。

肺高血圧クライシスの予防・治療は、刺激を和らげ、肺血管抵抗を低下させ、血行動態を安定化させることである。術後の痛み、吸痰刺激、体位変換、啼泣により肺血管抵抗が上昇し肺高血圧クライシスの契機となるため、リスクの高い患者では、鎮痛・鎮静薬だけでなく、予防的に筋弛緩薬を含めた深麻酔も考慮する⁷⁸⁾。また、100% 酸素を用いた中等度の過換気も有効である。上述のように、肺血管抵抗は肺容量が小さくても大きくても増加し、機能的残気量で最も低くなる。そのため、適切な PEEP により肺容量を closing capacity よりも高く維持し無気肺を予防し、かつ過剰な一回換気量を避けることが重要である。肺血管抵抗は、薬剤によっても調節可能であるが、多くが肺血管抵抗と体血管抵抗を同じ方向へ変化させる。一方で、血管平滑筋拡張作用のある一酸化窒素の吸入は、急速な不活化により肺血管のみを拡張させ、体血管抵抗にあまり影響を与えず肺血管抵抗を低下させることができるため、小児心臓麻酔領域において頻用される。

おわりに

これまで述べてきたように、小児心臓麻酔に関しても、データベース研究や多施設研究を含めた臨床研究の進歩により、以前よりもエビデンスが増えてきているのは確かである。小児心臓麻酔に関わる麻酔科医は、臨床的な感覚を磨くと同時に、研究からの視野も兼ね備える必要がある。

文 献

- 1) Singh A, Bahadorani B, Wakefield BJ, et al: Brachial Arterial Pressure Monitoring during Cardiac Surgery Rarely Causes Complications. *Anesthesiology* 2017; 126: 1065-76
- 2) Scheer B, Perel A, Pfeiffer UJ. Clinical review: complications and risk factors of peripheral arterial catheters used for haemodynamic monitoring in anaesthesia and intensive care medicine. *Crit Care* 2002; 6: 199-204
- 3) Rossi AF, Seiden HS, Gross RP, et al: Oxygen transport in critically ill infants after congenital heart operations. *Ann Thorac Surg* 1999; 67: 739-44
- 4) Rossi AF, Sommer RJ, Lotvin A, et al: Usefulness of intermittent monitoring of mixed venous oxygen saturation after stage I palliation for hypoplastic left heart syndrome. *Am J Cardiol* 1994; 73: 1118-23
- 5) Grigore AM, Murray CF, Ramakrishna H, et al: A core review of temperature regimens and neuroprotection during cardiopulmonary bypass: does rewarming rate matter? *Anesth Analg* 2009; 109: 1741-51
- 6) Engelman R, Baker RA, Likosky DS, et al: The Society of Thoracic Surgeons, The Society of Cardiovascular Anesthesiologists, and The American Society of ExtraCorporeal Technology: Clinical Practice Guidelines for Cardiopulmonary Bypass—Temperature Management during Cardiopulmonary Bypass. *J Extra Corpor Technol* 2015; 47: 145-54
- 7) Aynsley-Green A, Pickering D: Use of central and peripheral temperature measurements in care of the critically ill child. *Archives of disease in childhood* 1974; 49: 477-81
- 8) Murdoch IA, Qureshi SA, Mitchell A, et al: Core-peripheral temperature gradient in children: does it reflect clinically important changes in circulatory haemodynamics? *Acta Paediatr* 1993; 82: 773-6

- 9) Butt W, Shann F : Core-peripheral temperature gradient does not predict cardiac output or systemic vascular resistance in children. *Anaesth Intensive Care* 1991 ; 19 : 84-7
- 10) Kimura S, Butt W : Core-Peripheral Temperature Gradient and Skin Temperature as Predictors of Major Adverse Events Among Postoperative Pediatric Cardiac Patients. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2021
- 11) Andropoulos DB, Stayer SA, Diaz LK, et al : Neurological monitoring for congenital heart surgery. *Anesth Analg* 2004 ; 99 : 1365-75
- 12) Fukui Y, Ajichi Y, Okada E : Monte Carlo prediction of near-infrared light propagation in realistic adult and neonatal head models. *Appl Opt* 2003 ; 42 : 2881-7
- 13) Dullenkopf A, Frey B, Baenziger O, et al : Measurement of cerebral oxygenation state in anaesthetized children using the INVOS 5100 cerebral oximeter. *Paediatr Anaesth* 2003 ; 13 : 384-91
- 14) Kurth CD, Steven JL, Montenegro LM, et al : Cerebral oxygen saturation before congenital heart surgery. *Ann Thorac Surg* 2001 ; 72 : 187-92
- 15) Zaleski KL, Kussman BD : Near-Infrared Spectroscopy in Pediatric Congenital Heart Disease. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2020 ; 34 : 489-500
- 16) Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ, et al : Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery : a randomized, prospective study. *Anesth Analg* 2007 ; 104 : 51-8
- 17) Bettex DA, Schmidlin D, Bernath MA, et al : Intraoperative transesophageal echocardiography in pediatric congenital cardiac surgery : a two-center observational study. *Anesth Analg* 2003 ; 97 : 1275-82
- 18) Andropoulos DB : *Anesthesia for Congenital Heart Disease*, 3rd Edition. Wiley-Blackwell ; 2015
- 19) Hanouz JL, Massetti M, Guesne G, et al : In vitro effects of desflurane, sevoflurane, isoflurane, and halothane in isolated human right atria. *Anesthesiology* 2000 ; 92 : 116-24
- 20) Rivenes SM, Lewin MB, Stayer SA, et al : Cardiovascular effects of sevoflurane, isoflurane, halothane, and fentanyl-midazolam in children with congenital heart disease : an echocardiographic study of myocardial contractility and hemodynamics. *Anesthesiology* 2001 ; 94 : 223-9
- 21) Laird TH, Stayer SA, Rivenes SM, et al : Pulmonary-to-systemic blood flow ratio effects of sevoflurane, isoflurane, halothane, and fentanyl/midazolam with 100% oxygen in children with congenital heart disease. *Anesth Analg* 2002 ; 95 : 1200-6, table of contents
- 22) Sebel PS, Bovill JG, Boekhorst RA, et al : Cardiovascular effects of high-dose fentanyl anaesthesia. *Acta Anaesthesiol Scand* 1982 ; 26 : 308-15
- 23) Hickey PR, Hansen DD : Fentanyl-and sufentanil-oxygen-pancuronium anesthesia for cardiac surgery in infants. *Anesth Analg* 1984 ; 63 : 117-24
- 24) Donmez A, Kizilkan A, Berksun H, et al : One center's experience with remifentanyl infusions for pediatric cardiac catheterization. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2001 ; 15 : 736-9
- 25) Kin N, Weismann C, Srivastava S, et al : Factors affecting the decision to defer endotracheal extubation after surgery for congenital heart disease : a prospective observational study. *Anesth Analg* 2011 ; 113 : 329-35
- 26) Wodey E, Chonow L, Beneux X, et al : Hemodynamic effects of propofol vs thiopental in infants : an echocardiographic study. *Br J Anaesth* 1999 ; 82 : 516-20
- 27) Gelissen HP, Epema AH, Henning RH, et al : Inotropic effects of propofol, thiopental, midazolam, etomidate, and ketamine on isolated human atrial muscle. *Anesthesiology* 1996 ; 84 : 397-403
- 28) Williams GD, Jones TK, Hanson KA, et al : The hemodynamic effects of propofol in children with congenital heart disease. *Anesth Analg* 1999 ; 89 : 1411-6
- 29) Rouby JJ, Andreev A, Leger P, et al : Peripheral vascular effects of thiopental and propofol in humans with artificial hearts. *Anesthesiology* 1991 ; 75 : 32-42
- 30) Bray RJ : Propofol infusion syndrome in children. *Paediatr Anaesth* 1998 ; 8 : 491-9
- 31) Sprung J, Schuetz SM, Stewart RW, et al : Effects of ketamine on the contractility of failing and nonfailing human heart muscles in vitro. *Anesthesiology* 1998 ; 88 : 1202-10
- 32) Morray JP, Lynn AM, Stamm SJ, et al : Hemodynamic effects of ketamine in children with congenital heart disease. *Anesth Analg* 1984 ; 63 : 895-9
- 33) Weiss M, Dullenkopf A, Fischer JE, et al : Prospective randomized controlled multi-centre tri-

- al of cuffed or uncuffed endotracheal tubes in small children. *Br J Anaesth* 2009 ; 103 : 867-73
- 34) Litman RS, Maxwell LG : Cuffed versus uncuffed endotracheal tubes in pediatric anesthesia : the debate should finally end. *Anesthesiology* 2013 ; 118 : 500-1
- 35) Rimensberger PC, Cheifetz IM, Pediatric Acute Lung Injury Consensus Conference G. Ventilatory support in children with pediatric acute respiratory distress syndrome : proceedings from the Pediatric Acute Lung Injury Consensus Conference. *Pediatr Crit Care Med* 2015 ; 16 (5 Suppl 1) : S51-60
- 36) Alviar CL, Miller PE, McAreavey D, et al : Positive Pressure Ventilation in the Cardiac Intensive Care Unit. *J Am Coll Cardiol* 2018 ; 72 : 1532-53
- 37) Luecke T, Pelosi P : Clinical review : Positive end-expiratory pressure and cardiac output. *Crit Care* 2005 ; 9 : 607-21
- 38) Kimura S, Iwasaki T, Oe K, et al : High Ionized Calcium Concentration Is Associated With Prolonged Length of Stay in the Intensive Care Unit for Postoperative Pediatric Cardiac Patients. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2018 ; 32 : 1667-75
- 39) Torres SF, Iolster T, Schnitzler EJ, et al : Hypotonic and isotonic intravenous maintenance fluids in hospitalised paediatric patients : a randomised controlled trial. *BMJ Paediatr Open* 2019 ; 3 : e000385
- 40) McNab S, Duke T, South M, et al : 140 mmol/L of sodium versus 77 mmol/L of sodium in maintenance intravenous fluid therapy for children in hospital (PIMS) : a randomised controlled double-blind trial. *Lancet* 2015 ; 385 : 1190-7
- 41) Kannan L, Lodha R, Vivekanandhan S, et al : Intravenous fluid regimen and hyponatraemia among children : a randomized controlled trial. *Pediatr Nephrol* 2010 ; 25 : 2303-9
- 42) Feld LG, Neuspiel DR, Foster BA, et al : Clinical Practice Guideline : Maintenance Intravenous Fluids in Children. *Pediatrics* 2018 ; 142
- 43) Lehr AR, Rached-d'Astous S, Barrowman N, et al : Balanced Versus Unbalanced Fluid in Critically Ill Children : Systematic Review and Meta-Analysis. *Pediatr Crit Care Med* 2022 ; 23 : 181-91
- 44) Kimura S, de la Hoz MAA, Raines NH, et al : Association of Chloride Ion and Sodium-Chloride Difference With Acute Kidney Injury and Mortality in Critically Ill Patients. *Crit Care Explor* 2020 ; 2 : e0247
- 45) Jonas RA, Wypij D, Roth SJ, et al : The influence of hemodilution on outcome after hypothermic cardiopulmonary bypass : results of a randomized trial in infants. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2003 ; 126 : 1765-74
- 46) Newburger JW, Jonas RA, Soul J, et al : Randomized trial of hematocrit 25% versus 35% during hypothermic cardiopulmonary bypass in infant heart surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2008 ; 135 : 347-54, 354 e341-4
- 47) Wypij D, Jonas RA, Bellinger DC, et al : The effect of hematocrit during hypothermic cardiopulmonary bypass in infant heart surgery : results from the combined Boston hematocrit trials. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2008 ; 135 : 355-60
- 48) Agus MS, Steil GM, Wypij D, et al : Tight glyce-mic control versus standard care after pediatric cardiac surgery. *N Engl J Med* 2012 ; 367 : 1208-19
- 49) Rossano JW, Taylor MD, Smith EO, et al : Glycemic profile in infants who have undergone the arterial switch operation : hyperglycemia is not associated with adverse events. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2008 ; 135 : 739-45
- 50) de Ferranti S, Gauvreau K, Hickey PR, et al : Intraoperative hyperglycemia during infant cardiac surgery is not associated with adverse neurodevelopmental outcomes at 1, 4, and 8 years. *Anesthesiology* 2004 ; 100 : 1345-52
- 51) Pasquali SK, Hall M, Li JS, et al : Corticosteroids and outcome in children undergoing congenital heart surgery : analysis of the Pediatric Health Information Systems database. *Circulation* 2010 ; 122 : 2123-30
- 52) Gibbison B, Villalobos Lizardi JC, Aviles Martinez KI, et al : Prophylactic corticosteroids for paediatric heart surgery with cardiopulmonary bypass. *The Cochrane database of systematic reviews* 2020 ; 10 : CD013101
- 53) Nathan M, Levine JC, Van Rompay MI, et al : Impact of Major Residual Lesions on Outcomes After Surgery for Congenital Heart Disease. *J Am Coll Cardiol* 2021 ; 77 : 2382-94
- 54) Alghamdi AA, Singh SK, Hamilton BC, et al : Early extubation after pediatric cardiac surgery : systematic review, meta-analysis, and evidence-based recommendations. *J Card Surg* 2010 ; 25 : 586-95

- 55) Mahle WT, Nicolson SC, Hollenbeck-Pringle D, et al: Utilizing a Collaborative Learning Model to Promote Early Extubation Following Infant Heart Surgery. *Pediatr Crit Care Med* 2016 ; 17 : 939-47
- 56) Lofland GK: The enhancement of hemodynamic performance in Fontan circulation using pain free spontaneous ventilation. *Eur J Cardiothorac Surg* 2001 ; 20 : 114-8, discussion 118-9
- 57) Mutsuga M, Quinonez LG, Mackie AS, et al: Fast-track extubation after modified Fontan procedure. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2012 ; 144 : 547-52
- 58) Ono M, Georgiev S, Burri M, et al: Early extubation improves outcome following extracardiac total cavopulmonary connection. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2019 ; 29 : 85-92
- 59) Gaies M, Tabbutt S, Schwartz SM, et al: Clinical Epidemiology of Extubation Failure in the Pediatric Cardiac ICU: A Report From the Pediatric Cardiac Critical Care Consortium. *Pediatr Crit Care Med* 2015 ; 16 : 837-45
- 60) Davis S, Worley S, Mee RB, et al: Factors associated with early extubation after cardiac surgery in young children. *Pediatr Crit Care Med* 2004 ; 5 : 63-8
- 61) Kintrup S, Malec E, Kiski D, et al: Extubation in the Operating Room After Fontan Procedure: Does It Make a Difference? *Pediatr Cardiol* 2019 ; 40 : 468-76
- 62) Rooney SR, Mastropietro CW, Benneyworth B, et al: Influence of Early Extubation Location on Outcomes Following Pediatric Cardiac Surgery. *Pediatr Crit Care Med* 2020 ; 21 : e915-21
- 63) Wernovsky G, Wypij D, Jonas RA, et al: Postoperative course and hemodynamic profile after the arterial switch operation in neonates and infants. A comparison of low-flow cardiopulmonary bypass and circulatory arrest. *Circulation* 1995 ; 92 : 2226-35
- 64) Hoffman TM, Wernovsky G, Atz AM, et al: Efficacy and safety of milrinone in preventing low cardiac output syndrome in infants and children after corrective surgery for congenital heart disease. *Circulation* 2003 ; 107 : 996-1002
- 65) Hoffman TM, Wernovsky G, Atz AM, et al: Prophylactic intravenous use of milrinone after cardiac operation in pediatrics (PRIMACORP) study. Prophylactic Intravenous Use of Milrinone After Cardiac Operation in Pediatrics. *American heart journal* 2002 ; 143 : 15-21
- 66) Chang AC, Atz AM, Wernovsky G, et al: Milrinone: systemic and pulmonary hemodynamic effects in neonates after cardiac surgery. *Crit Care Med* 1995 ; 23 : 1907-14
- 67) Nakanishi T, Seguchi M, Takao A: Development of the myocardial contractile system. *Experientia* 1988 ; 44 : 936-44
- 68) Vogt W, Laer S: Treatment for paediatric low cardiac output syndrome: results from the European EuLoCOS-Paed survey. *Archives of disease in childhood* 2011 ; 96 : 1180-6
- 69) Willems A, Harrington K, Lacroix J, et al: Comparison of two red-cell transfusion strategies after pediatric cardiac surgery: a subgroup analysis. *Crit Care Med* 2010 ; 38 : 649-56
- 70) Cholette JM, Rubenstein JS, Alfieri GM, et al: Children with single-ventricle physiology do not benefit from higher hemoglobin levels post cavopulmonary connection: results of a prospective, randomized, controlled trial of a restrictive versus liberal red-cell transfusion strategy. *Pediatr Crit Care Med* 2011 ; 12 : 39-45
- 71) Cholette JM, Swartz MF, Rubenstein J, et al: Outcomes Using a Conservative Versus Liberal Red Blood Cell Transfusion Strategy in Infants Requiring Cardiac Operation. *Ann Thorac Surg* 2017 ; 103 : 206-14
- 72) Gupta P, King C, Benjamin L, et al: Association of Hematocrit and Red Blood Cell Transfusion with Outcomes in Infants Undergoing Norwood Operation. *Pediatr Cardiol* 2015 ; 36 : 1212-8
- 73) Blackwood J, Joffe AR, Robertson CM, et al: Association of hemoglobin and transfusion with outcome after operations for hypoplastic left heart. *Ann Thorac Surg* 2010 ; 89 : 1378-84 e1371-2
- 74) Li J, Schulze-Neick I, Lincoln C, et al: Oxygen consumption after cardiopulmonary bypass surgery in children: determinants and implications. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2000 ; 119 : 525-33
- 75) Manthous CA, Hall JB, Olson D, et al: Effect of cooling on oxygen consumption in febrile critically ill patients. *Am J Respir Crit Care Med* 1995 ; 151 : 10-4
- 76) Moat NE, Lamb RK, Edwards JC, et al: Induced hypothermia in the management of refractory low cardiac output states following cardiac surgery in infants and children. *Eur J Cardiothorac Surg* 1992 ; 6 : 579-84 ; discussion 585
- 77) Vernon DD, Witte MK: Effect of neuromuscular

- blockade on oxygen consumption and energy expenditure in sedated, mechanically ventilated children. Crit Care Med 2000 ; 28 : 1569-71
- 78) Abman SH, Hansmann G, Archer SL, et al: Pediatric Pulmonary Hypertension: Guidelines From the American Heart Association and American Thoracic Society. Circulation 2015 ; 132 : 2037-99
- 79) Bando K, Turrentine MW, Sharp TG, et al: Pulmonary hypertension after operations for congenital heart disease: analysis of risk factors and management. J Thorac Cardiovasc Surg 1996 ; 112 : 1600-7 ; discussion 1607-9

*

*

*