

ロボット手術 2nd Phase

徹底分析
シリーズロボット支援下心臓手術の
実際

麻酔科医の視点から

加藤 光晴・吉谷 健司

ロボット支援下心臓手術 robot assisted cardiac surgery (RACS) は、2018 年に弁形成術、2024 年に弁置換術が保険収載され、従来の低侵襲心臓手術 minimally invasive cardiac surgery (MICS) よりもさらに低侵襲化された手術として注目されている。RACS では、立体視野とロボットアームにより狭い術野でのより繊細な手技が可能となる。RACS は広義には MICS に含まれ、麻酔管理も MICS と共通する点が多い。本稿では RACS における麻酔管理の実際について、麻酔科医の視点から解説する。

術前診察のポイント
心肺機能評価
RACS の適応となる疾患は、多くが僧帽弁閉鎖不全症や三尖弁閉鎖不全症である。各疾患に準じた術前評価を行うほか、分離肺換気 one lung ventilation (OLV) を行うための一般的な評価を行う。OLV による肺血管抵抗の上昇により右室の後負荷は上昇するため、右心機能にも注意が必要である。

血管評価
術前の画像検査で大動脈の性状、脱血管の挿入経路を確認する。国立循環器病研究センター（以下、当院）では右内頸静脈と大腿静脈からの 2 本脱血を基本としている。右内頸静脈から中心静脈カテーテル (CVC)、肺動脈カ

テーテル (PAC)、脱血管を留置するため、径が細い場合や左上大静脈遺残がある場合には左内頸静脈からの留置について心臓外科医、臨床工学技士と検討する。

麻酔の準備

セッティング
RACS では数か所のポートを患者の右胸部に配置した後、患者左側からロボットのロールインが行われる。麻酔器や点滴架、エコー装置などはロボットやアーム、周辺機器と干渉しない位置へ配置する。ほかのロボット支援下手術と同様、ロールイン後は患者へのアクセスが制限されるため、ラインやチューブなどの確実な留置と固定を行う。また、事前に緊急ロールアウトの手順を把握しておく。

臨床メモ 1

PAC の縫い込み
RACS や MICS では脱血管留置位置の特性上、脱血管除去に伴う心臓周囲の縫合は行われない。三尖弁への介入がなく逆行性心筋保護も用いなかった場合は右房への縫合もないことから、右心系への縫合がまったくない症例は珍しくない。しかし、右側左房切開部やベント挿入部といった PAC の縫い込みが生じる可能性のある部位は存在するため、閉胸前の確認は必ず行う。また、術後の X 線検査で PAC の走行異常があれば手術室退室前に再度確認する。

KATO, Mitsuharu・YOSHITANI, Kenji
国立循環器病研究センター 麻酔科

徹底分析シリーズ ロボット手術 2nd Phase
色ベタ + スミベタ (以下同)

▼図1 当院での手術室のレイアウト

國中ネーム
・基本 11a M 中 G B B B
・太くするネーム
11a B 太く B101

図版は、0.12 のリットル
色ベタ 2 冊程度

(以内) 96
117

モニタリング

開心術に用いる一般的なモニターに加え、下肢低灌流を検出するための局所酸素飽和度 (rSO₂) モニターを両側腓腹筋に装着する。当院では、開心術のほぼ全症例で PAC を留置している。胸骨正中切開による開心術とは異なり、換気条件の変更や人工気胸を用いることのある RACS でも循環動態の把握に有用である (臨床メモ 1)。

麻酔管理

麻酔導入から麻酔維持

心拍出量の低下をきたしている場合、血管抵抗と心拍数の上昇で循環を維持している。麻酔導入に伴う血圧低下による冠灌流低下を避けるため、適切な量のフェニレフリンを持続投与しながら、十分量のミダゾラム、レミフェンタニル、ロクロニウムを用いて導入を行う。維持はプロポフォール、レミフェンタニル、ロクロニウムで行う。フェニレフリンの持続投与は肺動脈圧波形を含む各種モニターを指標に投与量を調整する。輸液負荷を行いながらフェニレフリンの投与量を減量していくことが多いが、緊急手術など血管内容量過多の状態であった場合には満血を行うこともある。体位変換や OLV 前後でのパラメータの変化にも注意し、麻酔導入後から手術室退室まで常に最適な循環動態となるよう管理する。

分離肺換気 (OLV)

左用ダブルルーメンチューブを使用する。人工心肺中にチューブの位置調整を要することがないように、適正位置での確実な固定は必須である。少なくとも

も挿管時と体位変換後の 2 回、気管支鏡による位置確認を行う。離被架の位置が低いことや頸部の回旋による先端位置の変化にも注意する。迅速な肺の虚脱、位置異常の頻度、肺出血時の対応などの観点から、当院では気管支ブロッカーではなくダブルルーメンチューブを選択している。

トラブルシューティング

低酸素血症

側臥位ではなく仰臥位に近い体位での OLV であることや、原疾患による心拍出量低下、胸水、肺水腫などの影響から、OLV 中に低酸素血症を生じることがある。肺外科手術の際と同様に、換気側肺の適切な呼吸器設定、気管内分泌物の除去、リクルートメント、非換気側肺への酸素投与などを行う。また、心拍出量の増加や輸血により非換

気側肺の酸素飽和度を上昇させることも検討する。ポートの対側の胸水は術中に吸引することが困難なため、経食道心エコー (TEE) 挿入後に著明な胸水があれば執刀前のドレーン留置について術者と相談する。手術進行の妨げとならないよう、非換気側肺への持続気道陽圧 (CPAP) の付加や両肺換気は術者と相談して行う。一酸化窒素吸入療法は酸素化、循環ともに管理を容易にする可能性があるものの、必要となる症例は多くない。OLV での手術進行が困難であれば早期の人工心肺確立を検討する。

血管合併症

大腿からガイドワイヤーを挿入する際に、対側の下肢や肝静脈へ迷入することがある。後述するように TEE で確認する。RACS と同様に大腿動脈から送血管挿入を行う MICS では医源性大動

徹底分析
シリーズ

ロボット手術 2nd Phase

臨床メモ 2

ロボット支援下手術の欠点

RACSに限らず、ロボット支援下手術の欠点の一つに、触覚がないことが挙げられる。機種によっては力覚フィードバックを搭載したものもあり、RACSにおいても導入さ

れつつあるが、まだ一般的ではない。合併症の低減のため、今後のさらなる技術革新が期待される。

臨床メモ 3

MICSやRACSにおけるベージング

正中開胸による心臓手術の場合、心室ベージングで十分な心拍出量が得られない場合は心房ベージングの追加が考慮される。しかしMICSやRACSの場合、視野の問題で基本的には心室ベージングのみで人工心

肺を離脱する。十分な心拍数の洞調律の回復に伴いベージングなしで手術室を退室することが多いが、血行動態次第では心房ベージングの追加を術者と相談する。

脈解離の発生率が上昇する可能性が指摘されている (MICS 0.75%, MICS 以前 0.06 ~ 0.29%)⁹⁾。医源性大動脈解離のリスク因子として、ほかにも年齢 (> 60 歳)、アジア人、術前ステロイド使用、末梢血管疾患など⁹⁾があり、これらのリスク因子を複数有する症例は決してまれではない。大動脈解離を発症するタイミングは多様であり、人工心肺中も含め各種モニターによる連続的な監視で早期発見に努める。

出血

胸骨正中切開による開心術とは異なる出血点が存在すること、出血への対応が遅れる可能性があることを知っておく。胸壁 (ポート挿入部)、大腿の送脱血管挿入部といった想起しやすい出血点や心筋保護カニューレ抜去部の止血に難渋することがあるほか、腹腔内出血の報告もある^{3, 4)}。横隔膜、肝臓へのアームの接触やポートによる損傷が原因と考えられており (臨床メモ 2)、開腹手術による止血が行われている。

輸液による希釈や出血量と不釣り合いなヘモグロビン低下がある場合、肝臓周囲の確認も入念に行う必要がある。

人工気胸

ロボット支援下で内胸動脈剥離を行う際、二酸化炭素の送気による人工気胸を用いることがある。基本的にセッティングが左右逆となること、胸腔内圧の上昇に伴う呼吸循環動態の悪化、ポートの対側の内胸動脈剥離を行う場合に両側開胸となる可能性があることなどに注意が必要である。

心筋保護と人工心肺離脱

視野やワーキングスペースが狭いことから、順行性の心筋保護液の投与が主体である。心筋保護液再投与による手術手技の中断を最小にするため、海外では単回投与で長時間の心筋保護が可能な del Nido 液や HTK 液が選択されることが多いが、日本では未承認である。当院では、MICS や RACS においては del Nido 液の特徴を踏襲した心筋保護液を院内で調整し使用している。del Nido 液を用いた場合、大動脈遮断解除後の調律は心室細動が少なく洞調律が多いものの、房室ブロックと心静止も多い⁵⁾。強心薬の投与とベージングを行う (臨床メモ 3)。

胸骨正中切開の場合と異なり、順行性心筋保護カニューレは上行大動脈に垂直ではなく斜めに挿入される。ルートベントとして使用する場合、左下へ約 20° ベッドを傾けることで空気除去を促進させることができる⁶⁾。ロールアウト後など安全にベッドを動かせる状況での手段の一つとして知っておく。人工心肺離脱後にも OLV を行う場合

があるため、右心機能低下症例では特に空気除去を入念に行う。

再膨張性肺水腫

RACS による僧帽弁手術では 1.4% で再膨張性肺水腫が発生する⁷⁾。肺高血圧や長時間の人工心肺などがリスク因子として報告されている。RACS では MICS よりも人工心肺時間が長くなる⁸⁾ものの、RACS は再膨張性肺水腫に対して保護的であるという報告⁹⁾もあることから、RACS 自体はリスク因子ではないと思われる。再膨張性肺水腫に限らず、術後の呼吸循環動態に懸念がある場合は人工心肺離脱後に両肺換気の状態で評価し、必要に応じて人工心肺回路に使用した送脱血管のうち適切な組み合わせで体外式膜型人工肺 (ECMO) へ移行する。

TEE の役割

RACS や MICS に特有の TEE の役割は、主に送脱血管の位置確認である。大腿からの送血管、大腿静脈および内頸静脈からの脱血管挿入の際に TEE での確認を行う。当院では TEE プロブ挿入後に、PAC、CVC、脱血管の順に留置を行っている。送血管、脱血管ともに基本的に TEE ガイドのみで行っているが、ガイドワイヤーが下行大動脈や右房まで到達しづらい場合は X 線透視併用下での留置としている。

術後管理

抜管のタイミングと場所

術後 6 時間以内の抜管を目指すことは安全かつ回復を早める可能性があ

る¹⁰⁾。一部の低リスク患者における MICS では手術室抜管が可能である¹¹⁾ことから、RACS でも同様に適切な症例選択を行えば、手術室抜管は安全に施行可能と考える。当院では現時点では患者要因や効率的な手術室運営などの観点からメリットがデメリットを上回っていないと考えており、手術室抜管は選択していない。OLV を継続する場合を除き、ほぼすべての症例でシングルルーメンチューブに交換後に ICU へ入室し、おおむね 6 時間以内に抜管している。

術後鎮痛

ICU 管理は、外科医、集中治療医、麻酔科医が交代で担当し、オピオイド鎮痛薬とプロポフォールを主体とした鎮痛・鎮静を行っている。フェンタニルの供給制限後、早期抜管が困難な症例などにおいてレミフェンタニルを選択することもあるが、基本的には使用経験が豊富で医療スタッフが管理に慣れているフェンタニル持続投与を中心としている。

RACS は患者への低侵襲性という大きな利点を有する一方で、MICS と同様多くの特殊な配慮とトラブルシューティング技術が必要な手術である。RACS 特有の合併症を理解し、予防と早期発見、適切な対応に努めることで、真に安全な低侵襲手術を実現できる。

13% 見逃す HB 31

文献

1. Bauer SJ, Sugimura Y, Schoettler FI, et al. Iatrogenic aortic dissection in minimally invasive cardiac surgery for atrioventricular valves and atrial structures. Eur J Cardiothorac Surg 2025 ; 52 : 111-117.
2. Williams ML, Sheng S, Gammie JS, et al. Aortic dissection as a complication of cardiac surgery : report from the Society of Thoracic Surgeons database. Ann Thorac Surg 2010 ; 90 : 1812-6.
3. Duan JS, Sun T, Ge SL, et al. A case of abdominal bleeding after mitral valvuloplasty assisted by da Vinci robotic surgery. J Card Surg 2020 ; 35 : 683-5.
4. Franke UFW, Huether F, Ghinescu M, et al. Robotically assisted mitral valve surgery-experience during the restart of a robotic program in Germany. Ann Cardiothorac Surg 2022 ; 11 : 596-604.
5. Garcia-Suarez J, Garcia-Fernandez J, Martinez Lopez D, et al. Clinical impact of del Nido cardioplegia in adult cardiac surgery : a prospective randomized trial. J Thorac Cardiovasc Surg 2023 ; 166 : 1458-67.
6. Amabile A, Geirsson A, Krane M, et al. De-airing maneuvers after minimally invasive and robotic-assisted intracardiac procedures. Braz J Cardiovasc Surg 2023 ; 38 : 407-10.
7. Moss E, Halkos ME, Binongo JN, et al. Prevention of unilateral pulmonary edema complicating robotic mitral valve operations. Ann Thorac Surg 2017 ; 103 : 98-104.
8. Husen TF, Kohar K, Angelica R, et al. Robotic vs other surgery techniques for mitral valve repair and/or replacement : a systematic review and meta-analysis. Hellenic J Cardiol 2023 ; 71 : 16-25.
9. Kesävuori RI, Vento AE, Lundbom NMI, et al. Unilateral pulmonary oedema after minimally invasive and robotically assisted mitral valve surgery. Eur J Cardiothorac Surg 2020 ; 57 : 504-11.
10. Grant MC, Crisafi C, Alvarez A, et al. Perioperative care in cardiac surgery : a joint consensus statement by the Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) Cardiac Society, ERAS International Society, and The Society of Thoracic Surgeons (STS). Ann Thorac Surg 2024 ; 117 : 669-89.
11. Malvindi PG, Bifulco O, Berretta P, et al. On-table extubation is associated with reduced intensive care unit stay and hospitalization after trans-axillary minimally invasive mitral valve surgery. Eur J Cardiothorac Surg 2024 ; 65 : ezae010.