

徹底分析
シリーズ

ロボット手術 2nd Phase

ロボット支援下心臓手術の実際

外科医の視点から：
優れた操作性による
利点を心臓の弁膜症手術にも

角田 宇司・福島 五月

ロボット支援下心臓手術 robot assisted cardiac surgery (RACS) は、医療者と患者の双方に多くの利点を有しており、現在急激に症例数が増加している分野である。しかし、もともとの開心術という複雑な手術にロボットを組み合わせた本術式の手術難易度は高い。まさに心臓外科医、麻酔科医、看護師、臨床工学技士のチーム力が問われる手術である。手術難易度は高いが、習熟した施設では胸骨正中切開よりも少ない出血量と短い時間で手術可能であり、そのポテンシャルは高い。

近年、RACSは米国を中心に急速に普及している。米国におけるロボット支援下僧帽弁形成術は、2015年は全僧帽弁形成術の10.9%であったが、2021年には14.6%へと増加した¹⁾。現在では100を超える施設でRACSが行われており、その割合はさらに上昇しているものと思われる。

日本では、2011年の医師主導治験

を経て、2015年12月にda Vinci SおよびSiが、2016年3月にはda Vinci Xiが薬事承認され、心臓手術にda Vinciロボットの使用が認められるようになった。当初は自費診療でしか行えなかったため、ごく限られた施設でのみ実施されていたが、2018年4月に鏡視下弁形成手術にロボットを用いることが保険適用となり、日本においてロボット支援下弁形成手術の普及が始まった。その後、2018～2020年の3年間にロボット支援下単独僧帽

minimally invasive cardiac surgery (MICS) の発展

11a ロタンDB
14 H
(以下同)

図中 ネーム
・基本 11a M中G BBB
・太付るネーム 11a 太付 B10
(以下同)

図版は、0.12mmケイ
色ベタ2面
(以下同)

87
117

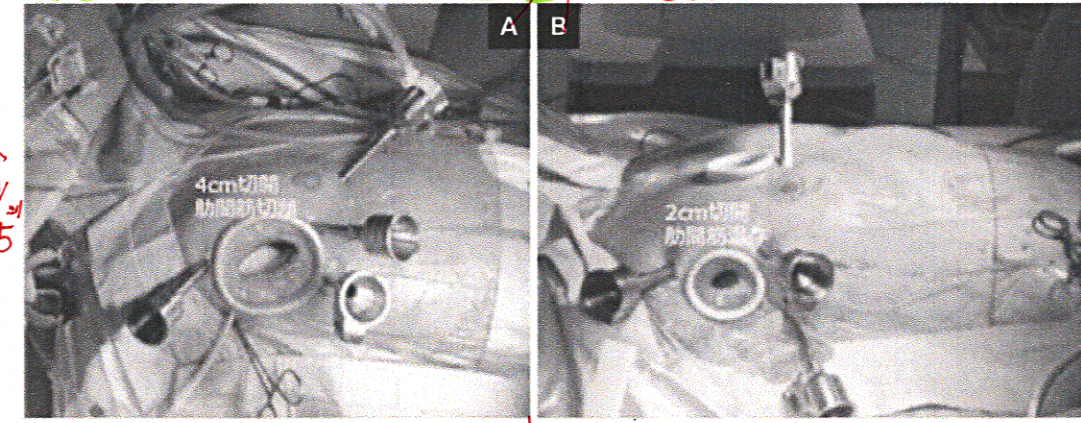
KAKUTA, Takashi・FUKUSHIMA, Satsuki
国立循環器病研究センター 心臓外科

0.5mmケイ・色ベタ・矢印 14mm

色ベタ(以下同)

徹底分析シリーズ ロボット手術 2nd Phase
色ベタ+スミ20% (以下同)

図2 ポート配置：通常のRACS (A)とkeyhole手術 (B)の違い (文献6より、改変)



弁形成術が598例実施された²⁾。現在、43施設がRACS認定施設として認められており、日本でも症例数は年々増加していると思われる。さらに2024年6月にロボット支援下弁置換術(1弁・2弁)が保険適用となった。今後さらなる症例数の増加や手術適応の拡大が予想される。

利点、適応術式、禁忌

低侵襲小開胸下心臓手術 minimally invasive cardiac surgery (MICS) は、RACS、完全鏡視下、直視下に大別される(図1)。MICSは胸骨正中切開と比較して、死亡率や脳卒中など重大合併症の発生率は同等である一方で、術後心房細動、輸血率、集中治療室滞在日数、在院日数、創部感染は有意に改善すると報告されている^{3,4)}。その中でRACSはほかのMICSと比較して、鉗子の可動性が広く繊細な操作が可能であるため、深部や限られた視野でも正確な剥離や縫合が可能となる。RACSの導入により、漏斗胸などの胸郭変形のある患者や複雑な病変の弁形成などでも低侵襲心臓手術が可能となった⁵⁾。習熟した施設ではロボット支援下2弁手術、メイズ手術併施、低侵襲冠動脈バイパス術 minimally invasive direct

coronary artery bypass (MIDCAB) 併施なども実施されている。米国の一部の施設では、完全ロボット支援下冠動脈バイパス術 totally endoscopic coronary artery bypass grafting (TECAB) が実施されているが、日本ではまだ認可されていない。実際には、現在の触覚のないロボットでは1～2mmの脆弱な血管の切離・吻合は難しく、またバイパス専用のロボット鉗子がないため、この分野においてはテクノロジーの進化が待たれるところである。

患者選択として、以下のような場合はRACSを避ける場合がある。末梢血管に重度の動脈硬化や狭窄があり大腿カニキュレーションが困難な場合、右胸腔に強い癒着がある場合、同時に複数の冠動脈バイパスが必要な冠動脈疾患を有する場合、上行大動脈に高度の石灰化がある場合、である。再手術の症例も一般的にはRACSを避けることが多いが、症例や右胸腔の癒着の程度によっては実施可能な場合もある。

手術の実際

体位 右半側臥位を基本とし、右腕を下げるように固定し、右腋窩をできる限り広く露出させる。右肩は左アームと干渉

することがあるため、なるべく下げるようにする。腋窩の剃毛は必須である。体位固定後にあらかじめアプローチする肋間のマーキングをしてもよい。右肘が屈曲する体位となるため、静脈・動脈ラインともなるべく左手に確保するように努める。

ポート配置

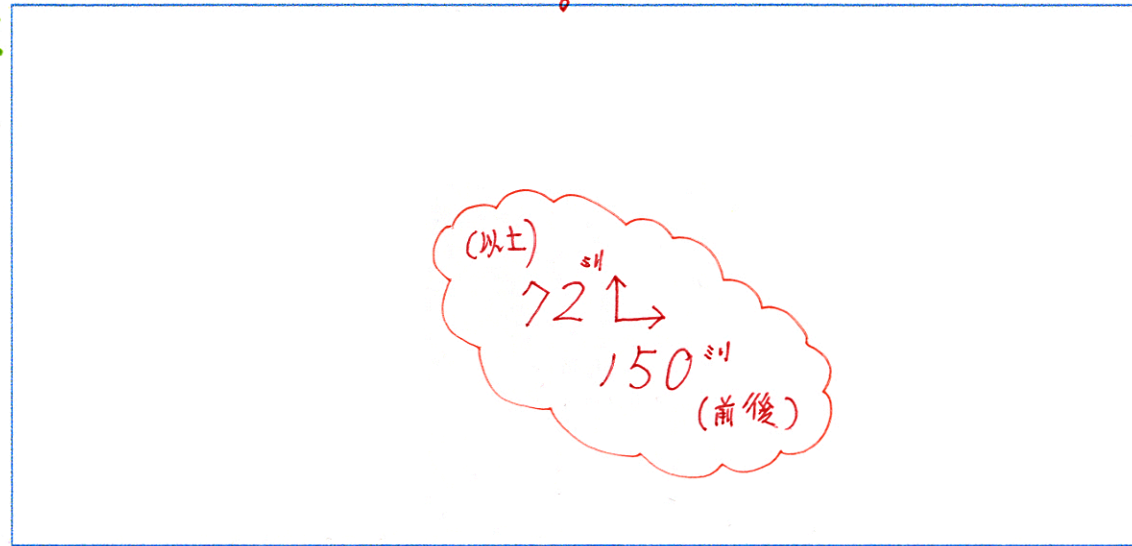
ポート配置は各施設でやや異なるが、国立循環器病研究センター(以下、当院)では、僧帽弁手術の際は、左アームポートは第3肋間、カメラポート、心房リトラクターポートは第4肋間、右アームポートは第6肋間を基本配置としている(図2)。肥満患者で横隔膜挙上がある場合は、右アームを第5肋間としてもよい。また大動脈弁手術の際は、それぞれのポートを1肋間ずつ上にずらした配置をとる。胸部の手術では、腹部のロボット手術と比較してポート挿入箇所が肋間に制限され、各ポート間距離が近くなりやすい。心停止中のアーム干渉は、心停止時間の延長のみならず、意図しないアームの動きにより想定外の組織損傷につながる可能性があるため、クリアランス機能などを用いて十分注意した配置とする。

徹底分析
シリーズ

ロボット手術 2nd Phase

14a ロボット手術

図3
RACSの手順



臨床メモ

筆者は多数の RACS の経験の中で、SVC カニューレによる奇静脈損傷、IVC カニューレによる腸骨静脈損傷、肝静脈損傷、大動脈カニューレからの逆行性大動脈解離をいずれも経験したことがあり、カニューレ付属の先端 J 型ワイヤーで抵抗を感じた

ラジフォーカスガイドワイヤー M (テルモ社) に変更し、それでも抵抗を感じたら透視で確認するように徹底している。ワイヤーの迷入は血管損傷の原因となるため、麻酔科医の TEE による適切なガイドが安全な体外循環確立の鍵である。

体外循環

カニューレ選択や挿入方法は各施設で異なる。大腿動脈 (FA) と大腿静脈 (FV) のカニレーションのみで手術を施行する場合や、右内頸静脈 (IJV) から上大静脈 (SVC) 脱血を追加し、上下大静脈脱血とする場合がある。SVC カニューレの挿入方法は、ドレーピング前の中心静脈カテーテル (CVC) 挿入時に同時挿入し、ヘパリン添付生理食塩液 (500 mL + 1000 単位) をドリップしておく方法や、右首までドレーピングし術野から挿入する方法などがある。カニューレ先端は、奇静脈より心臓側かつ右肺動脈下端より下方へ行かないようにする。これは吸引脱血により心房壁を陰圧損傷させないた

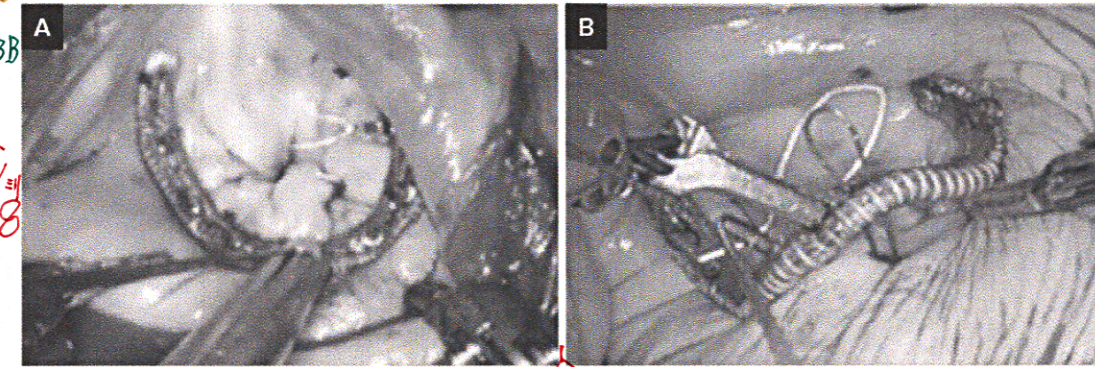
めである。高齢者の RACS では大動脈プラークが存在することがあり、その場合は右鎖骨下動脈送血を追加することは躊躇しない。当院では、RACS を行う患者は全例で術前造影 CT を撮影しており、安全な体外循環の確立を徹底している。カニューレの先端の位置確認は、経食道心エコー (TEE) で確認する施設や透視装置を使用する施設がある。簡便なのは前者であるが、麻酔科医の TEE 技術や患者の血管走行によっては難しいこともあり、少しでも挿入時に抵抗や違和感があったら迷わず透視装置を使用すべきである (臨床メモ)。挿入時の動脈損傷や大動脈解離、静脈損傷は、時に致命的になるとともに、低侵襲手術から、胸部正中切開を上回る高侵襲手術となり得る。

ロボットのロールイン

RACS の方法は、どの時点でロボットのロールインを行うかで大きく二つに大別される。一つは大動脈遮断まで直視下もしくはカメラ補助下に行い、その後ロボットをロールインして心内操

図4 人工弁縫着方法の違い

A. interrupt mattress suture (2-0 Ethibond® + Cor-knot®)
B. continuous suture (3-0 V-Loc®)



作を行う方法、もう一つは手術開始とともにロボットをロールインし、心膜切開から止血まですべてロボットで行う方法である (図3)。後者のほうが技術的難易度は高いが、視野確保のための肋間筋切開を避けることができるため、患者への侵襲はさらに低い。この術式は、一部の施設では keyhole cardiac surgery と呼ばれる。keyhole 手術であれば、さらに出血量や疼痛は減少し、また右胸腔内の癒着も最低限に抑えることができるので、RACS の目指す形となる。当院では、シンプルな僧帽弁形成手術においては keyhole 手術で、そのほか併施手術がある場合や弁置換手術の場合は肋間筋切開を置いた RACS で行っている。

心内操作

弁置換や弁形成は胸骨正中切開とほぼ同様の手技である。唯一、僧帽弁輪縫縮の人工リング縫着方法は異なることがある。RACS では糸のからまり予防や手術時間短縮のために、有刺縫合糸 barbed suture である 3-0 V-Loc™ 針 (Medtronic 社) を用いた連続縫合で人工弁輪の縫着を行うことが多い (図4)。胸部正中切開や通常の MICS では使用されない方法であるが、ロボットア

ム特有の広い可動性が連続縫着を可能としており、当院における長期予後の検討では、通常の縫着方法と比較して、逆流の再発率は同等の成績であった。

大動脈遮断解除後

通常の開心術と同様に、TEE を用いて形成弁や人工弁に問題がないか確認する。もし問題があればロボットの再ロールイン、再形成を躊躇してはいけない。人工心肺離脱後は、通常は片肺換気下に右肺を虚脱させながら止血を行い、心膜閉鎖・ドレーン挿入後に両肺換気へと戻す。この際に循環動態の変動が起こるため、注意が必要である。創部被覆し、ドレープを剥がした後に、気管チューブをダブルルーメンチューブから通常のチューブへと戻し、胸部 X 線でそれぞれのチューブ位置を確認する。

トラブル時の
開胸への移行

出血 (特に心臓損傷、大動脈損傷)、大動脈解離、CO₂ ガス塞栓症、片肺換気不能、視野不良、ロボット不具合など、重大なトラブルが発生した際には迅速な方針転換が必要である。他科と比較して、心停止中にトラブルが生じ

た場合は特に迅速な対応が必要となる (コメント)。具体的な対応方法としては、①ロボットの緊急ロールアウト、②拡大右開胸もしくは胸骨正中切開への迅速な移行、③循環停止やカニューレ位置変更の検討、④ TEE による診断を同時に行う。トラブル時の流れの明確化を目的としたロールプレイ訓練などを施設のプロトコルとして整備し、事前にチーム全員で共有しておくことは RACS の安全性を高める鍵となる。

麻酔科医の
知るべきこと

RACS では、麻酔科医の役割は通常の開心術よりも非常に大きい。主な麻酔科医の役割として下記が挙げられる。

- 片肺管理での呼吸管理
- 右肺の完全な脱気 (ダブルルーメンチューブ位置の確認)
- 肺血管抵抗の変化に伴う循環変動に対する対応
- TEE によるカニレーションのガイド (FA, FV, IJV)
- 術前の弁機能・心機能評価
- 術後の弁機能・心機能評価 (人工弁周囲漏出 paravalvular leakage (PVL), 残存大動脈弁逆流 aortic valve regurgitation (AR) / 僧帽弁逆流 mitral

色ベタ+スミ20%
文字白ヌキ 13&新ゴM
0.3mmケイ・色ベタ+スミ20%
地・スミ10%

コメント

minimal invasive から maximum invasive
とならないように、低侵襲手術であるロボ
ット手術ほど合併症の予防・回避がなによりも重要であることを肝に銘じる。

34
valve regurgitation (MR), 収縮期
前方運動 systolic anterior motion
(SAM) など]

- ヘパリンやプロタミン投与による血液凝固の管理, 活性化凝固時間 (ACT) モニタリング
- 合併症発生時の TEE による迅速な診断 (大動脈解離, 心筋梗塞, ほか)
- 局所酸素飽和度 (rSO₂) などによる下肢虚血・頭部虚血の連続モニタリング

片肺換気および二酸化炭素 (CO₂) 送気によって静脈還流低下, 肺血管抵抗の上昇, 高二酸化炭素血症が生じる可能性があるため, 気道内圧, 吸入酸素濃度 (FiO₂), 呼気終末二酸化炭素分圧 (PETCO₂) の継続的モニタリングと, 必要に応じた循環作動薬の準備が必須である。また, 長時間の人工心肺となった場合は再膨張性肺水腫を呈する可能性があるため, 両肺換気再開後は注意が必要である。出血の観点では, RACS は通常出血量が少ないため, 胸骨正中切開と比較してプロタミン投与から閉胸までの時間が短い。無輸血を目指す症例が多くを占めるため, 可能であれば術前に自己血貯血を考慮してもよい。術後疼痛管理では, 肋間神経ブロックなどの局所鎮痛技術の併用, 早期抜管・離床のプロトコル化により, 短期アウトカム改善に寄与することが報告⁹⁾されている。

● ● ● ● ● 色50%
RACS はチーム医療であり, 心臓外科

医, 麻酔科医, 看護師, 臨床工学技師士の連携が肝である。プロセスの標準化, チェックリスト導入, シミュレーション訓練を通じたチームトレーニングは, 成績の向上に直結すると思われる。

13&見出しMB3/
文献 色ベタ

1. Mori M, Parsons N, Krane M, et al. Robotic mitral valve repair for degenerative mitral regurgitation. *Ann Thorac Surg* 2024; 117: 96-1054.
2. Watanabe G, Kumamaru H, Kinukawa N, et al. Successful launch of robot-assisted mitral valve repair in Japan under universal health coverage. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2025; 169: 1242-50.
3. Williams ML, Hwang B, Huang L, et al. Robotic versus conventional sternotomy mitral valve surgery: a systematic review and meta-analysis. *Ann Cardiothorac Surg* 2022; 11: 490-503.
4. Al Shamry A, Jegaden M, Ashafy S, et al. Minithoracotomy versus sternotomy in mitral valve surgery: meta-analysis from recent matched and randomized studies. *J Cardiothorac Surg* 2023; 18: 101.
5. Fujita T, Kakuta T, Kawamoto N, et al. Benefits of robotically-assisted surgery for complex mitral valve repair. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2021; 32: 417-25.
6. Kakuta T, Fukushima S, Shimahara Y, et al. Early results of robotically assisted mitral valve repair in a single institution: report of the first 100 cases. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 2020; 68: 1079-85.
7. Ishikawa N, Watanabe G. Robotic mitral valve repair in Japan and keyhole cardiac surgery in NewHeart Watanabe Institute. *Ann Cardiothorac Surg* 2022; 11: 538-9.
8. Maj G, Regesta T, Campanella A, et al. Optimal management of patients treated with minimally invasive cardiac surgery in the era of Enhanced Recovery After Surgery and Fast-Track Protocols: a narrative review. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2022; 36: 766-75.

39
1/a
15 H
13 H
まが可!!
1/a
15 H
13 H
まが可!!