ロボット支援下低侵襲僧帽弁手術

中村喜次

千葉西総合病院　心臓血管外科　主任部長

はじめに

僧帽弁閉鎖不全症(MR)に対する僧帽弁形成におけるロボット支援下手術の導入は1998年に最初の報告がされている[1]．手技の煩雑性，高コストという理由で，一般の施設に広く普及するには及ばず，北米を中心としたごく一部の施設でのみ施行されていた．近年になり，泌尿器科領域を中心として，ロボット支援下手術の有効性が認められ，かつ手術支援ロボットの改良が進んだことで，心臓外科領域でも注目されるようになった．日本でも2018年4月にロボット支援下弁形成術が保険収載されたことで，25施設がロボット心臓手術認定施設となり，現在までに約2000件の心臓関連の手術が行われている．ロボット支援下僧帽弁形成術(RMVP)は人工心肺＋心停止下という独特な環境下での手術である点，剝離は必要ないが縫合を多用した再建手術であるという点で，他領域のロボット支援下手術と異なる複雑性が存在する[2]．本稿ではRMVPの特徴を説明しつつ，低侵襲性と根治性，技術高度化と後進教育の共存に関して論じることとする．

日本で薬事承認されている手術支援ロボット

da Vinci® サージカルシステム

現在，世界中で普及している手術支援ロボットはda Vinci® サージカルシステム(Intuitive Surgical, Inc., California, USA)のみである(**図1**)．da Vinci® サージカルシステムは1980年代にアメリカ軍が遠隔操作でバトルフィールドの負傷者に手術を行うために開発が始まり，その後，民間の手により1999年に完成した．その後，数回のアップデートを重ね，現在は第4世代のXiが主流モデルとなっている．2020年の統計では世界中で120万件以上のda Vinci® サージカルシステムを用いた手術が行われている．da Vinci® サージカルシステムはペイシェントカート，ビジョンカート，コンソールから構成される(**図1**)．従来の内視鏡下手術の鉗子にはなかったリストに相当する関節があり，微細な7軸の動きが可能であることに加え，人間の関節の可動域を超えた540度の回転やフィルター機能(手振れ補正)がある．従来の内視鏡手術ではモニターを通して見た鉗子の動きと実際の手の連動を脳で一旦解釈しながら行う必要があった(鉗子と手の動きが逆方向になるなど)．それに対しda Vinci® サージカルシステムを使用した場合，コンピューター制御により手指の動きを，そのまま縮小した形で鉗子類の先端に伝達することができるため，3Dモニターとマスターコントローラーを使用した鉗子操作が極めて直感的な操作となる．この点は手術の安全性を高めるだけでなく，後述のRMVPの後進教育に関しても大きな役割を果たす．

hinotori™ サージカルロボットシステム

hinotori™ サージカルロボットシステム(メディカロイド社，神戸，日本)は日本で開発された手術支援ロボットで2020年8月に泌尿器科領域において製造販売承認を取得している(**図2**)．da Vinci® サージカルシステムと似たシステムであるが，hinotori™



図 1　da Vinci® サージカルシステム

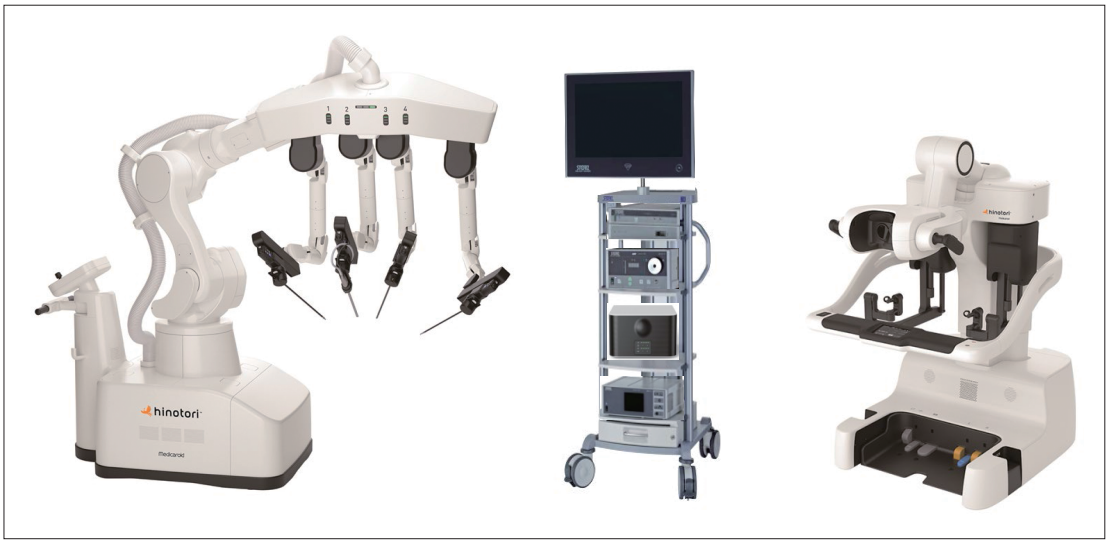

図 2　hinotori™ サージカルロボットシステム

サージカルロボットシステムのオペレーションユニットは da Vinci® サージカルシステムよりもアームの関節が一つ多く 8 軸となっており操作性が向上している．またアームとポートとのドッキングが不要という特徴がある．内視鏡は Karl Storz 社製を搭載している．

da Vinci® サージカルシステムを使用した RMVP の手術手技

内視鏡下で完遂する方法を述べる．コンソールからロボットを操作する外科医(コンソールサージャン)と，患者サイドでロボットのアーム操作やワーキングポートからの操作を行う外科医(ペイシェントサイトサージャン)の 2 名が必要である．全身麻酔，

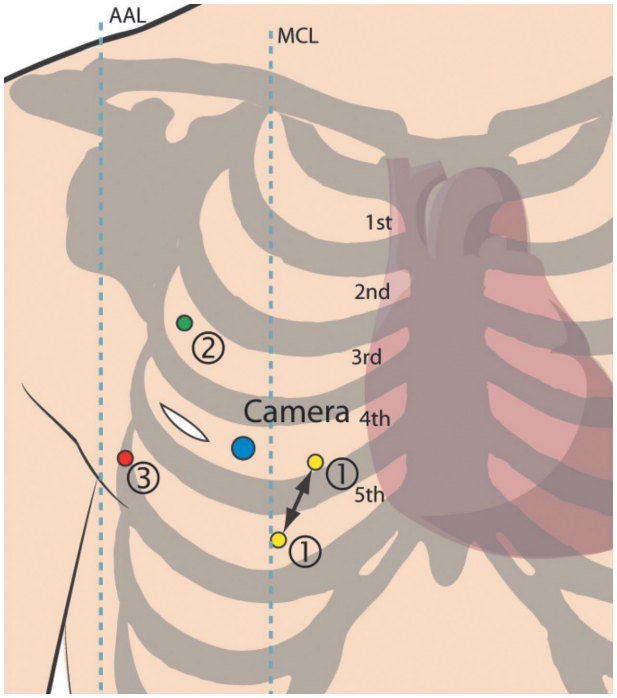

図 3　ロボット支援下僧帽弁形成術でのポート配置
①左房リトラクター用ポート，
②左手用ポート，③右手用ポート
AAL：前腋窩線，MCL：中鎖骨線

片肺換気で体位は左半側臥位とする．

ポートはまずカメラ用を左第 4 肋間に挿入し胸腔内を確認後，そのやや外側に 3 cm の皮膚切開を置き，ワーキングポートを作成する．左手用ポートを第 3 肋間前腋窩線，右手用ポートを第 5 肋間前腋窩線に配置する．左房リトラクター用ポートは左房の位置をみて決めても良いが第 4 肋間または第 5 肋間に配置されることが多い(**図 3**)．当院では整容性に優れることからこのポートは乳輪切開を用いて挿入している．同時進行で大腿動静脈カニュレーションで人工心肺を確立する．

ロボットをポートにドッキングし胸腔鏡下に手術を進める．人工心肺が安定していることが確認できたら，心嚢膜を切開し右側心嚢膜を胸壁越しに牽引する．ワーキングポートを通してルートカニュラを挿入し上行大動脈を transverse sinus レベルで遮断する．順行性心筋保護液を注入し心停止後，右側左房をロボットのバイポーラーシザーズで切開し，左房リトラクターで僧帽弁を展開する．僧帽弁の形成手技は胸骨正中切開での手技と大きく変わりはないが，人工弁輪の縫着は連続縫合を好む外科医が多い．なお，縫合糸は切れにくいという理由でゴアテックス糸が多用される．

形成終了後，右側左房をゴアテックス糸で二重に縫合閉鎖し，deairing の後，ペイシェントサイトサージャンにより遮断解除，経食道エコーでも問題なければルートカニュラを抜去する．縫合糸の結紮は外科医の好みにより，ロボットで器械結紮する方法とペイシェントサイトサージャンがノットプッシャーあるいはコアノット® を使用して結紮する方法がある．この段階で内視鏡下に止血を確認し心嚢膜を閉鎖後，人工心肺離脱となる．ロボットをアンドックした後，ポートを抜去し胸壁の止血を入念に行い．チェストチューブを挿入後，閉創となる[2]．

RMVP における低侵襲性と根治性について

RMVP は正中切開の僧帽弁手術と比較すると低侵襲であることは明らかであるが，ロボットを使用しない MICS との比較では，その優位性は乏しい．特に内視鏡下 MICS では主創の他に 2 つのポートを挿入するだけでよく，4 つポートが必要となる RMVP は胸壁への侵襲という点では利点はないと考えられる．RMVP と MICS(ロボットを使用しない)との比較した報告は少ないが，Hawkins らは RMVP と MICS と胸骨正中切開の 3 群を比較し，RMVP 群は MICS 群と胸骨正中切開群より手術時間，人工心肺時間，遮断時間が長く，MICS 群，RMVP 群，胸骨正中切開群の順で ICU 滞在日数，入院日数が長くなると報告している[3]．RMVP はあくまでも内視鏡下 MICS の一手段と考えるべきであるが，手術支援ロボットを使用したほうが複雑性が増す可能性は否定できない．

RMVP の根治性に関しては MR 再発回避の長期成績が重要である．Suri らは 487 例の RMVP の MR >2 の回避率は 5 年で simple lesion では 96.2%，

complex lesion では 92.7% と報告している[4]．日本からの報告としては Tarui らが 213 例の RMVP の MR＞2 の回避率は 2 年で 90.7% と報告している[5]．胸骨正中切開での degenerative MR に対する僧帽弁形成の長期成績として，MR＞2 の回避率が 5 年で 95.6% と報告されており[6]，それと比較すると RMVP の耐久性も大きな遜色はないものと考えられる．

RMVP における技術高度化と後進教育について

胸骨正中切開と比較して RMVP を含めた内視鏡下 MICS 手術の技術の高度化は，僧帽弁形成自体がすべて内視鏡下で行われることにある．内視鏡下では術者に求められる技術難易度は高くなるが，手術支援ロボットはそれを補助するシステムであるため，手術支援ロボットを使用することにより技術難易度は数段階，下がることになる．これにはロボットの鉗子に関節が存在することに加え，コンピューター制御により操作を直感的に行えることが大きく寄与している（『日本で薬事承認されている手術支援ロボット』の項目参照）．これらは内視鏡下での技術トレーニングを受けていない心臓血管外科医にとって，大きな福音となる．ただし，RMVP では針の交換や連続縫合などをコンソールサージャンとペイシェントサイトサージャンが呼吸を合わせながら共同で行う必要がある．また従来の心臓手術では第一術者が人工心肺回路や心筋保護回路の管理やエア抜きに加え，麻酔科医や臨床工学技士と協調して手術全体を通した循環管理も行っているが，RMVP ではこれらの業務の多くをペイシェントサイトサージャンが担う．また臨床工学技士と看護師も手術支援ロボットの操作の一部を行う必要があり RMVP のシステムを精通しておく必要がある．言い換えると，RMVP では術者であるコンソールサージャンの負担は軽減するが，他のメンバーの経験，技術に依存することになり，習熟したチームワークが不可欠となる．

このソロサージャリーからチームワークサージャリーになることはラーニングカーブにも影響する．すなわちソロサージャリーでは一人の術者がラーニングカーブを克服すればよいが，チームワークサージャリーではチームのメンバー全員のラーニングの克服が必要であり，さらにはそのメンバー間の連携のためのラーニングカーブも必要になる．当院での Cumulative sum 解析を用いた検討ではラーニングカーブを克服するのに必要な症例数は MICS での MVP では 50-60 例であったのに対し[7]，RMVP では 80-90 例必要であった（**図 4**）．

後進教育に関してはロボットが力を発揮できる点が三つ存在する．一つ目は RMVP が内視鏡下での手技であるため，トレイニーが術者と全く同じ術野をモニターで共有でき，形成の経験値を蓄積できることである．また質の高い僧帽弁形成の成功には，経験によって培われた形成に対する高度な認識と，形成手技を確実に行える技術，の二つの要素が不可欠である．前者に関しては指導医がモニターを通して指導を行うことで，指導医の認識をトレイニーに提供することができる．後者に関してはトレイニーがコンソールサージャンとなっても，技術的な点を手術支援ロボットでカバーすることができる．これにより指導者・トレイニー両者のストレスも軽減され，実践教育に適していると考える．

二つ目はシミュレーターの存在である（**図 5**）．既存のロボットは触覚がないため，画像情報のみで手術を行う．これは弱点の一つであるが，逆にいうと画像と連動するシミュレーターがあれば，実際の手術と近似した練習をバーチャルで行うことができる．またシミュレーターに組み込まれたドリルにより各手技の習熟度を客観的に分析することも可能である[8]．

三つ目はデュアルコンソールシステムである（**図 6**）．これは同一手術内で二つのコンソールを使用し片方ずつ患者にドッキングしているペイシェントカートの操作権を任意に移行するシステムである．これを使用すれば片方がトレイニー，もう片方が指

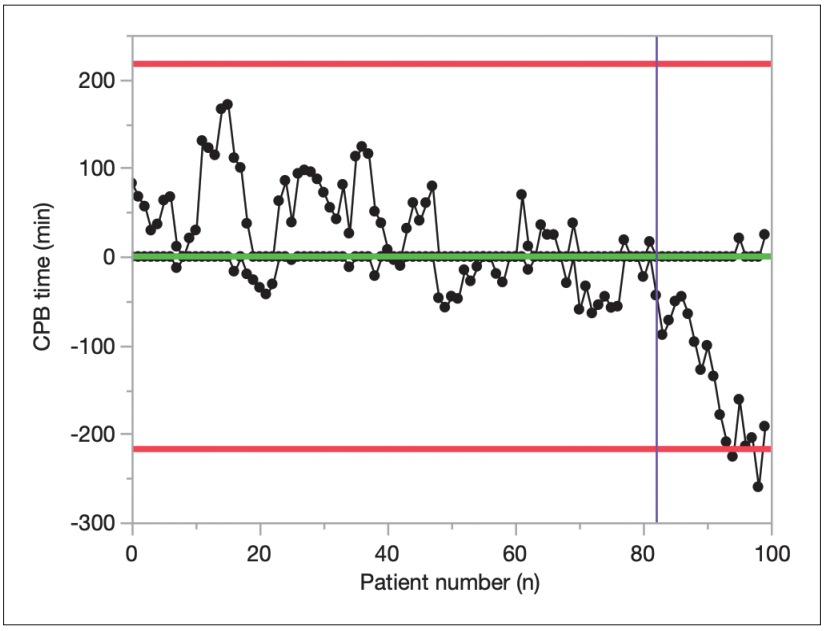

図 4　ロボット支援下僧帽弁形成術症例数と人工心肺時間（CPB）の関係における Cumulative sum 解析によるラーニングカーブ

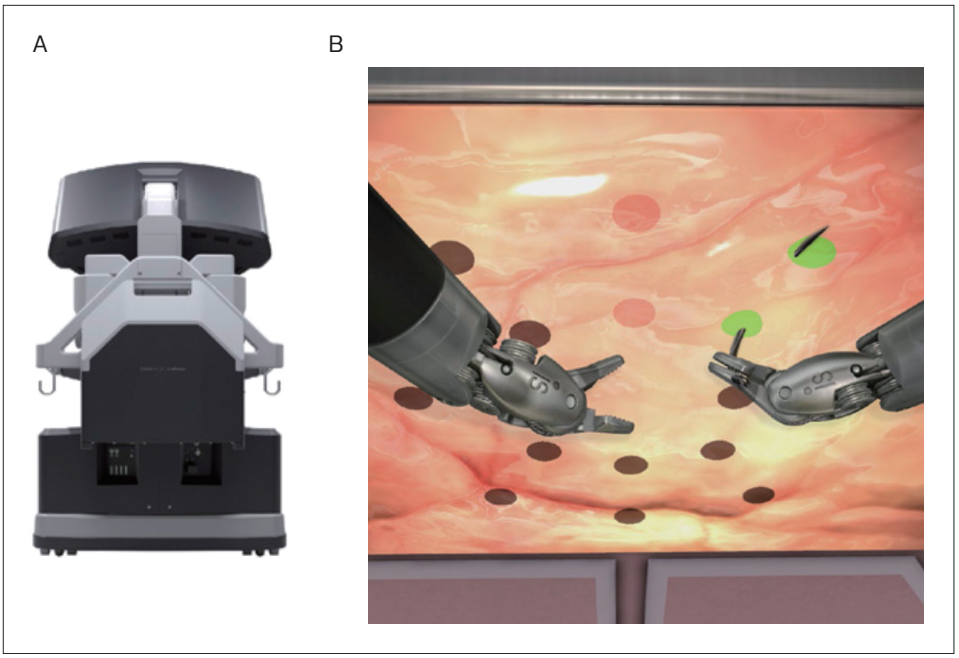

図 5　da Vinci® サージカルシステムのコンソール背面に装着された純正シミュレーター

A：da Vinci® サージカルシステムのコンソール背面に装着された純正シミュレーター
B：シミュレーションのモニター画面の例

導者となり，場所を交代したりすることなく，たとえ操作の途中であっても自由に操作の交代ができる．効率のよい教育が可能になるだけでなく，安全面でも非常に有効であると考える．

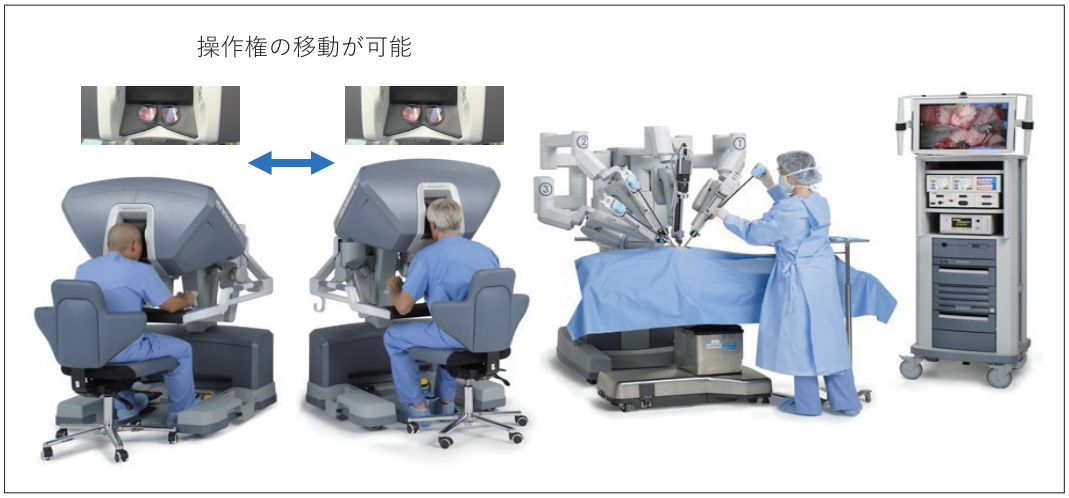

図6　デュアルコンソールシステムによる教育

まとめ

RMVPはチームワークを充実させることにより，低侵襲性を維持しつつ安定した僧帽弁形成が可能である．また後進教育に関して，手術支援ロボットは大きな潜在能力を有しており，今後の心臓外科領域における重要なツールとなると考えられる．

文　献

1) Carpentier A, Loulmet D, Aupècle B, et al：Computer assisted open heart surgery. First case operated on with success. *C R Acad Sci III* 1998；**321**：437-442
2) 中村喜次，新浪博士：ロボット支援下僧帽弁形成術の導入期成績．東女医大誌 2021；**91**：114-120
3) Hawkins RB, Hehaffey JH, Mullen MG, et al：A propensity matched analysis of robotic, minimally invasive, and conventional mitral valve surgery. *Heart* 2018；**104**：1970-1975
4) Suri RM, Taggarse DA, Burkhart HM, et al：Roboti mitral valve repair for simple and complex degenerative disease midterm clinical echocardiographic quality outcomes. *Circulation* 2015；**132**：1961-1968
5) Tarui T, Ishikawa N, Horikawa T, et al：First major clinical outcomes of totally endoscopic roboic mitral valve repair in Japan -a single center experience-. *Circ J* 2019；**83**：1668-1673
6) David TE, David CM, Tsang W, et al：Long-term results of mitral valve repair for regurgitation due to leaflet prolapse. *J Am Coll Cardiol* 2019；**74**：1044-1053
7) Hayashi Y, Nakamura Y, Hirano T, et al：Cumulative sum analysis for the learning curve of minimally invasive mitral valve repair. *Heart Vessels* 2021 Mar 27. doi：10.1007/s00380-021-01838-7.［Online ahead of print］
8) Lee JY, Mucksavage P, Kerbl DC, et al：Validation study of avirtual reality robotic simulator -role as an assessment tool? *J Urol* 2012；**187**：998-1002