ロボット支援下手術の現況

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-12-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: KADONO, Yoshifumi, MIZOKAMI , Atsushi メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00049294

金沢大学十全医学会雑誌　第126巻　第2号　30－33（2017）

【総説】

ロボット支援下手術の現況

Present state of robot-assisted surgery

金沢大学大学院医学系研究科　泌尿器科集学的治療学
角　野　佳　史，溝　上　　敦

は　じ　め　に

医療現場でのロボット使用は，1985年に産業用ロボットPUMA200を利用したのが最初と言われている．このときロボットは，脳腫瘍生検時にプローブの位置決めのアシストに使用された．1986年には，全人工股関節置換術にロボドックが使用され，コンピューター制御により大腿骨に人工股関節を挿入する穴を精確に開けることができた．腹部外科領域では，音声制御により内視鏡をコントロールできるイソップが登場，さらに，ロボットアームに改善を加えた遠隔手術ロボットシステムであるゼウスが誕生したが，一般の普及には至らなかった．その後，1999年1月に内視鏡手術支援ロボット，ダヴィンチが公表される．人間の手と腕を模倣して設計され，遠隔操作にて操作されるダヴィンチは，その有用性により各領域で使用され，現在の普及に至っている．その完成度の高さから，手術支援ロボットはほぼダヴィンチの独占市場であり，現状では，ロボット手術といえばダヴィンチ支援下手術と，ほぼ同義に使われるまでになっている．

従来行われてきた開腹手術は術創が大きく患者への負担が大きいことから，術後の痛みの少ない小さい創で行われる腹腔鏡手術が発展してきた歴史がある．しかし，内視鏡による平面画像の観察下（奥行きが分かりづらい）に操作性の悪い鉗子を使用して手術を行う必要があり，手術自体が高難度であることから，習熟にも時間を要するなど問題があった．この欠点を克服するべく登場してきたのがロボット手術と言える（図1）．ダヴィンチによる手術が我々を驚かせたのは，術者が清潔術野から離れた操作機（コンソール）より遠隔操作で手術を行うというコンセプトだけでなく，その鮮明な拡大立体画像を見ながら感覚的に緻密な操作ができるという完成度の高さにあった（図2）．ダヴィンチの登場は，それまでの低侵襲手術の概念を大きく変えてしまった．ダヴィンチを用いたロボット手術では，患者側に腹腔鏡手術と同様の腹部の小さな穴（ポート）を作成し，そこから細いロボット用の鉗子が挿入される（図3）．術者はコンソールに座り，ステレオビューアー（図4）という双眼鏡を埋め込んだようなのぞき窓をのぞき込み，その奥に広がる高解像度の立体画像を見ながら，手元の操作レバーを動か

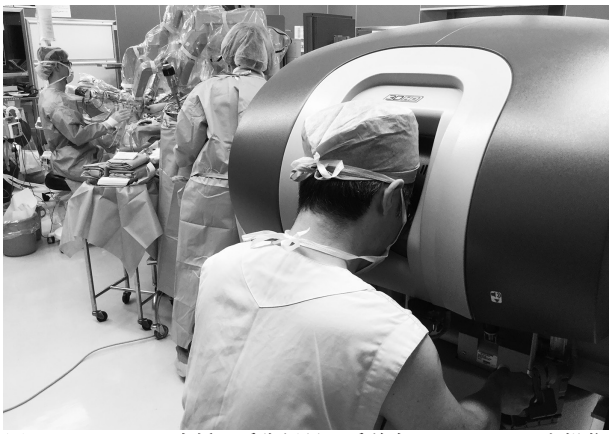


図1．ダヴィンチ支援下手術風景：手前右がコンソールを操作する術者，左奥にロボットがあり施術が進行する．ロボット側では，清潔な状態の助手と看護師が手術の進行をサポートする．



図2．手術用ロボット（ペイシェントカート）：4本のアームを持つ．矢頭が示す3本は手術操作用のロボットアームで，ロボット用鉗子が接続される．中央の矢印は，内視鏡用のアームで，内視鏡が接続される．

し，ロボットアームに接続された多関節鉗子を操ることで手術を行う (図5)．ロボットの動きは緻密かつ繊細で，画面から術者が観察できるロボットアーム先端にある鉗子の動きは手元にあるレバーの動きと見事に連動しており，感覚的な操作が可能である (図6)．本邦においては，2012年4月にロボット支援下前立腺全摘術が保険収載された後，爆発的に普及し，現在250台以上が稼動，国別の保有台数は，米国に次いで世界第2位となっている．



図3．患者側のロボット：右側が患者頭側，ロボットのアームは清潔なビニールで覆われ，その先端に接続される鉗子3本と体内を観察する内視鏡1本の計4本が腹部から骨盤方向に挿入される．右奥の清潔な助手が手術の進行をサポートする．



図4．ステレオビューアー：図1の術者が除いている部分の拡大図．中央やや下方にある双眼鏡を埋め込んだようなレンズを覗き込むと，内視鏡からの画像を構築した拡大立体画像を観察できる．

手術支援ロボット，ダヴィンチの歴史

元々は，アメリカにおいて1980年代末に遠隔操作で戦場の負傷者に対して手術を行うことを目的に，手術用ロボットの開発が進められたとされている．湾岸戦争が予想より早く終結したため，以後，民間で開発が続けられ，Intuitive surgical社から1999年にダヴィンチが発売された．翌2000年にはU.S. Food and Drug Administration (FDA) に認可され，すぐに前立腺全摘術が開始された．前立腺全摘術は限局性前立腺癌の標準治療であるにもかかわらず，開腹でも腹腔鏡でも出血が多く安定的に手術を行うのが困難な術式であった．また，術後には尿失禁や勃起障害などの機能的な問題があり，手術を受けた多くの患者を悩ませていた．ダヴィンチの使用により，圧倒的に術中出血は減少，術後尿失禁や勃起障害の程度や頻度も減少しており，ロボット手術が前立腺全摘術の世界標準となるまでになった．2017年7月現在，全世界で4000台以上のダヴィンチが稼動しており，さまざまな領域の外科手術に応用され，その実施症例数も右肩上がりである．ダヴィンチ自体は，2006年にハイビジョンを搭載したコンソールと，ロボットアームがコンパクトになったdaVinci Sが，2009年には操作機を2台使用可能としたダブルコンソールを擁するdaVinci Siが，2012年には天吊型で使い勝手の改善されたロボットとなったdaVinci Xiが登場し，徐々にバージョンアップしている．



図6．ロボット用鉗子先端部：ロボット用鉗子の先端部は自由度の高い多関節鉗子となっている．鉗子の先端は，ワイヤーによってアダプターに繋がっており，コンソールでの操作に連動し，感覚的に緻密な作業が可能となる．

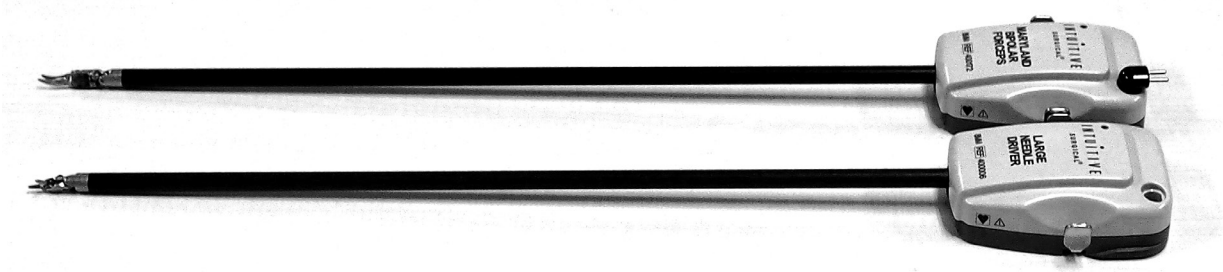


図5．ロボット用鉗子：右側はロボットアームに接続するアダプター部で左先端が体内に入る多関節鉗子である．

使えるロボット専用鉗子の種類も増加，止血装置などの開発も進み，創を減らした単孔式手術，術中のナビゲーションなど，さまざまな応用も進んでいる．

日本でのダヴィンチ手術

本邦においては，2001年頃治験目的でダヴィンチを用いた手術がわずかに行われたが，その後，しばらくは使われなかった．泌尿器科領域では，2006年以降に東京医大で行われたロボット前立腺全摘の良好な手術結果を背景に，2008年に本大学と九州大学も加わり，同手術の先進医療が認可された．2009年11月にはdaVinci Sが医療機器として薬事の承認を受け，2012年4月にはロボット前立腺全摘が保険適応となっている．さらに，その後の臨床試験での良好な成績が評価され，小径腎癌に対するロボット支援腎部分切除術が2016年4月に保険適応となっている．2017年現在，保険適応になっているのは，泌尿器科領域の2術式のみであり，他の一般外科や婦人科などの領域では，一部の施設において，施設の研究費(一部先進医療) や患者負担での自由診療で行われるのみとなっており，症例数はそれほど増えていない．日本は世界第2位のダヴィンチ保有国でありながら，その1台あたりの年間使用症例数は，世界平均の3分の1以下であり，十分に使用されているとは言いがたい．

ロボット支援前立腺全摘術

ダヴィンチが登場したときに，真っ先に導入されたのが，前立腺癌に対する前立腺全摘術であった．前立腺は，膀胱直下にある男性にしかない臓器で精液の一部を作っている．前立腺癌はもともと欧米に多い癌であったが，近年日本でも増加傾向であり，2016年のがん罹患数予測では，胃癌を抜いて男性のトップになると報告されている．限局性前立腺癌では，以前より前立腺全摘術が根治治療のひとつとして広く行われてきた．解剖学的には，頭側には膀胱，背側には直腸があり，骨盤の最深部にそれらにふたをされたように存在する前立腺の手術は，狭い視野での作業を余儀なくされ，前立腺周囲には静脈叢も発達しているために一般に出血も多くなり，難易度が高い手術である．開腹や腹腔鏡下に行っていた従来の方法では，視野の確保や操作に難渋することが多く，安定的に良好な成績を出すことが難しかった．ダヴィンチは，狭い空間での細かな作業に特にその優位性が発揮されるため，前立腺全摘は最もよい適応であると言える．

もともと傷を小さくして患者さんへの術後の負担を減らすことを目的に発達してきた腹腔鏡手術ではあったが，奥行きの分かりにくい平面画像を見ながら操作性の悪い鉗子を使って手術を行わなければならなかったことが手術を高難度にしていた．しかし，ダヴィンチは腹腔鏡手術の低侵襲性を維持しながら見事にその弱点を補っている．そればかりでなく，開腹手術ではしばしば問題となった静脈出血による視野の不良も少ないために (通常の腹腔鏡手術同様，ダヴィンチ手術は炭酸ガス気腹下での手術であり，その気腹圧のために静脈性出血が極めて少なくなる)，解像度の高い内視鏡の利点を存分に発揮した良好な視野で，ロボットアームの特徴である緻密な操作により，精度の高い手術が可能となる[1]．当院においてもロボット手術導入以前の開腹前立腺全摘では平均で1000ml以上出血していたものが，現在のロボット手術では100ml程度で済むことが多く，これまでの当科で行った300件を越える症例で術中に同種血輸血を行ったことはない．前立腺全摘後は，尿失禁と勃起障害が大きな後遺症となるが，欧米からの大規模な報告からは，いずれにおいても，従来の開腹や腹腔鏡手術と比較してロボット手術の優位性が報告されている[2),3)]．他施設からの報告同様，当科においても従来の術式に比べてロボット手術の術後機能障害はかなり改善されている．前立腺周囲は厚みのある結合組織で覆われており，最近の報告により，前立腺周囲組織をできるだけ多く残すほうが，術後の機能障害の予防に有用であると考えられている[4]．前立腺摘除の際には，術前検査による癌の前立腺内の局在を予測し癌の取り残しのないような前立腺摘除ラインを設定，ダヴィンチの拡大視野を利用することで，その計画通りの手術を行うことが可能となる．当科においても，癌の状態により前立腺摘除の剥離ラインを症例毎に変えており，機能障害を最小限に抑えるようにしている．

ロボット支援腎部分切除術

慢性腎機能障害 (CKD) の概念が広がり，腎癌においても小径腎癌に対する腎温存手術 (腎部分切除術) の生命予後への優位性が示されるにつれて，小径腎癌に対してはできるだけ腎部分切除を行うべき，というのが現在の全世界的なコンセンサスとなっている[5),6)]．腎部分切除を行うに当たっては，摘除標本が小さいために摘出に大きな創を必要としないことから，腹腔鏡手術のよい適応と考えられる．しかし，腎部分切除を行う際，そのまま腎に切り込むと出血するため，通常，腎動脈を遮断し血液の流入がない状態で腎部分切除と止血操作を行う必要がある．ただ，腎は虚血に弱い臓器であり，動脈遮断時間が長くなると腎へのダメージのために術後の腎機能に悪影響を及ぼすため，摘除と止血はすばやく行う必要がある．前述のように腹腔鏡手術は操作性が悪いために，腎部分切除は技術的に難しく，腫瘍の大きさや位置により，一般に適応が限られてきた．ここでもロボットの操作性の良さが威力を発揮する．ロボット支援腎部分切除術と腹腔鏡下腎部分切除術を比較したシテマティックレビューおよびメタアナリシスの報告では，ロボット手術の方が，術中の方針変更による開放手術や根治的腎摘術への移行率が低く，温阻血時間が短く，術後の腎機能低下が少なく，術後の入院期間が短いとされている[7]．同

様に，ロボット支援手術腎部分切除術と開放腎部分切除術を比較したシテマティックレビューおよびメタアナリシスの報告では，ロボット手術の方が，周術期合併症，術中出血量，入院期間で良好な結果であったとしている[8]．本邦で行われた前向きの臨床検討でも，設定した阻血時間と癌制御をクリアし，従来の術式に対する優位性を示し[9]，保険適応になったことは前述の通りである．当科でも20数例を経験し，ロボット手術の優位性を実感している．

ダヴィンチの問題点

ダヴィンチの大きな問題点として，その高額なコストが上げられる．本体のみで日本での販売価格は最新型の新規購入では，約3億円に達する (旧型の購入やレンタルなどの方法によりコストに差はある) ．また，使用の有無にかかわらず年間の保守契約にも高額の費用がかかる．また，患者に直接挿入されるロボット用の鉗子も安全のため10回の使用までに制限されたセミディスポとなっており，こちらの費用も安くない．ロボット前立腺全摘1例の診療報酬額は約95万円，ロボット腎部分切除1例の診療報酬額は約70万円と比較的高額ではあるが，消耗品やメインテナンス費用，ロボットの減価償却費等を考慮すると現状の日本での平均的な使用頻度では，十分な費用の回収は難しい．全体のコストを下げるためには，ロボット手術の症例数を増やす必要があるが，現在の保険適応が泌尿器科領域の2術式に限られるため，国内に現存する多くのダヴィンチが十分に稼動できていないことが問題であり，泌尿器科以外での外科領域でも保険適応が認められれば，稼動症例数を増やすことは可能であろう．しかし，医療費は年々増加傾向にあり，2017年国家財政支出報告ではその3分の1を社会保障費が占める現状で，適応範囲を広げ，高額なロボット手術件数を増やすこと自体が是か非かは難しい問題であり，費用対効果を十分に検討することは必須であろう．ただし，評価の方法が分かりやすい手術のアウトカムに限られることも現場の外科医からは意見もあるところである．すなわち，ロボット手術での術者の快適さは，数値には表れにくく，ロボット手術の導入による術者のストレス軽減など，他への影響も考慮してほしいところだが，こちらについては，実際に手術を行っている医師以外には，伝わりにくいことと思われる．

ダヴィンチは高いレベルで完成された手術支援ロボットであることは間違いない．唯一システムとしての不備を指摘するなら，触覚の欠如があげられる．コンソールで操作しているとときに感触として分かるのは，硬い骨などに当たったり，鉗子やカメラが体内もしくは体外で干渉したり物にぶつかったりして動かなくなる (動きにくくなる) 感覚のみである．ロボットアームの力は強く，柔らかい臓器であれば，簡単に損傷してしまうリスクがある．見えるところで操作をするのは，基本ではあるが，見えないところでもロボットのアームがどの位置にあるかを把握しておかないと事故につながる可能性があり，大事な留意点である．ただ，ロボット操作やその特性を熟知し慣れてしまうと，良好な拡大立体視野は，この欠点を補って余りあるもので，触覚がないことが手術の進行を妨げるものとはならない．

お わ り に

ダヴィンチの登場で，外科手術は大きく変化した．ロボット手術の登場は，患者にとっても外科医にとっても朗報であったといえる．問題となるコストは，医療全体の問題でもあり，限りある医療資源をどのように配分するかは今後の重要な課題といえる．ダヴィンチ以外の新規の手術用ロボットも開発されているようであり，ロボット手術自体のコストダウンにも今後期待したい．

文　　献

1）Novara G, Ficarra V, Rosen RC, Artibani W, Costello A, Eastham JA, et al. Systematic review and meta-analysis of perioperative outcomes and complications after robot-assisted radical prostatectomy. European urology. 2012;62(3):431-52.

2）Ficarra V, Novara G, Ahlering TE, Costello A, Eastham JA, Graefen M, et al. Systematic review and meta-analysis of studies reporting potency rates after robot-assisted radical prostatectomy. European urology. 2012;62(3):418-30.

3）Ficarra V, Novara G, Rosen RC, Artibani W, Carroll PR, Costello A, et al. Systematic review and meta-analysis of studies reporting urinary continence recovery after robot-assisted radical prostatectomy. European urology. 2012;62(3):405-17.

4）Kadono Y, Ueno S, Kadomoto S, Iwamoto H, Takezawa Y, Nakashima K, et al. Use of preoperative factors including urodynamic evaluations and nerve-sparing status for predicting urinary continence recovery after robot-assisted radical prostatectomy: Nerve-sparing technique contributes to the reduction of postprostatectomy incontinence. Neurourol Urodyn. 2016;35(8):1034-9.

5）Thompson RH, Boorjian SA, Lohse CM, Leibovich BC, Kwon ED, Cheville JC, et al. Radical nephrectomy for pT1a renal masses may be associated with decreased overall survival compared with partial nephrectomy. J Urol. 2008;179(2):468-71.

6）Zini L, Perrotte P, Capitanio U, Jeldres C, Shariat SF, Antebi E, et al. Radical versus partial nephrectomy: effect on overall and noncancer mortality. Cancer. 2009;115(7):1465-71.

7）Choi JE, You JH, Kim DK, Rha KH, Lee SH. Comparison of perioperative outcomes between robotic and laparoscopic partial nephrectomy: a systematic review and meta-analysis. European urology. 2015;67(5):891-901.

8）Wu Z, Li M, Liu B, Cai C, Ye H, Lv C, et al. Robotic versus open partial nephrectomy: a systematic review and meta-analysis. PLoS One. 2014;9(4):e94878.

9）Hinata N, Fujisawa M. Current status of robotic partial nephrectomy in Japan. Investigative and clinical urology. 2016;57:121-129.