

視点

ロボット支援手術



福島県医師会常任理事

小島 祥 敬

はじめに

ロボット支援手術は、1990年代、戦場で傷ついた兵士を米国本土や空母から医師が遠隔操作で手術するという発想から開発を進められました。2001年には、手術用内視鏡ロボット da Vinci surgical system が、アメリカ食品医薬品局（Food and Drug Administration：FDA）に認可されました。

わが国においては、2012年4月に前立腺癌に対するロボット支援前立腺全摘除術が保険収載されたのを契機に急速に普及しました。その後、多くの手術が保険収載され、現在では、泌尿器科のみならず外科、婦人科領域においても標準術式となりつつあります。また最近になって次々と新規機種が開発され、現在わが国で認可された手術用内視鏡ロボットは、同会社のものを同一機種とみなした場合、国産ロボット2機種を含め、4機種となっています。本稿では、ロボット支援手術の現況について紹介します。

手術用ロボットの現状

1）da Vinci surgical system

(1) standard da Vinci / da Vinci S surgical system

前立腺癌に対するロボット支援前立腺全摘除術は2000年に米国で開始され、2001年にアメリカ食品医薬品局（Food and Drug Administration：FDA）認可を得たのち急速に普及しました。ロボットの概念を最初に考えたとされるレオナルド・ダ・ヴィンチがその名前の由来となっています。開発当初の手術用ロボット da Vinci surgical system（インテュイティブサージカル社）は、いわゆる standard da Vinci と呼ばれるもので、現在一般的に用いられているものの原型となったものです。約20年前にもわが国においても数施設において個人輸入され、ロボット支援前立腺全摘除術が実際に行われていました。しかしシステムそのものが成熟しているとは言えず、ましてや保険適用のみならず薬事承認もなされていない状況では、普及する環境は十

分に整えられていませんでした。しかし第2世代の手術支援用ロボット da Vinci S surgical system が2009年に薬事承認され、2012年4月に根治的前立腺全摘除術が保険収載されるとともに急速に普及しました。

本システムは、操作ボックス（サージョンコンソール）、実際に術野に挿入するロボットアームが装着された装置（サージカルカート）、術野を映し出すモニター（ビジョンカート）の3つの装置に分けられます。術者はサージカルコンソールに座り、10倍以上の拡大視野を得、遠近感を有した3次元画像を見ながら手術操作を行うことができ、これまで開腹手術や腹腔鏡手術では不可能であった微細な膜構造の詳細な観察が可能となりました。術者が操作レバーを操ることによってサージカルカート上のロボットアームを遠隔操作することができます。ロボットアームには、手術操作を行う鉗子先端部に70度の可動性を有する関節機能および高い自由度を有するエンドリストが装着されており、これにより正確かつ繊細な手術操作を行うことができます。これらの機能により、術野の改善による出血量の減少、迅速な縫合による手術時間の短縮、解剖の理解による確実な機能温存が可能となるなど、従来の手術にない利点を有しています。また巧みに設定された2:1、3:1、5:1のモーションスケールや手振れ防止機能により、細かい吻合操作や剥離操作が、人の手より格段に正確に行うことができます。カメラとは別にロボットアームは3本あり、これらを使い分けることにより、執刀医自身によるより良い視野展開が確保することが可能です。

(2) da Vinci Si surgical system

2012年に第3世代の手術用ロボット da Vinci Si surgical system の登場により、デュアルコンソールやスキルシュミレーターによる術

者教育の充実が図られ、開放手術や腹腔鏡手術に比べ、一般的な標準的手術術式の普及が容易になったこともロボット支援手術の大きな特徴として挙げられます。第3世代の da Vinci Si surgical system、は、3D-HD vision の改善により画像がより鮮明となったとともに、コンソール（操作ボックス）のエルゴノミクス設定により、操作性機能の改善や安全機能の向上が図られました。2013年に福島県立医科大学附属病院に最初に導入されたのは本機種です。

(3) da Vinci Xi/X surgical system

第4世代の da Vinci Xi surgical system は、天吊りの支点から4本のアームが配置され、アームの関節が増え、可動域が広くなりました。したがって、方向の異なるアプローチで手術が可能となりました。また、アームも細くなりアーム同士の干渉が少なくなり、狭い術野でも手術が容易となりました。カメラも12mmから8mmに細くなったため、どのトロッカーからも挿入できるようになりました。

da Vinci X surgical system は、Si と Xi の中間の形態をしており、Si よりスリムになり、操作性が向上しました。Xi と X はカメラや鉗子、コンソールが共用できることもあり、福島県立医科大学附属病院では現在、Xi と X の2台が稼働しています。

(4) da Vinci SP surgical system

最近登場した da Vinci SP surgical system は、単孔式手術が行えるのが特徴です。既存の da Vinci surgical system は複数のアームで構成する多孔式なのに対し、SP はアームが1本のため切開創も最少1カ所で済み、患者負担のさらなる軽減や整容性の向上が期待できます。ロボットアームに取り付けられた直径2.5cmのカニューラと呼ばれる筒から、カメラ（内視鏡）と3本のインストゥルメン

ト（専用鉗子）を体腔内に挿入して手術を行うことができます。

福島県では2023年11月現在、9台（県北：2台、県中：3台、会津：2台、浜通り：2台）の da Vinci surgical system が稼働しており、そのうち7台が Xi、2台が X です。

2) hinotori

2013年、産業用ロボット技術を有する川崎重工業株式会社と、検査・診断技術を有し医療分野に強みを持つシスメックス株式会社の共同出資によりメディカロイドが設立されました。2015年より国産手術ロボットの開発を開始し、2020年12月に hinotori が販売開始されました。hinotori の名称は、医師でもあった漫画家・手塚治虫氏の代表作「火の鳥」にちなんでつけられたとされています。現在わ

が国では約40台の hinotori が稼働しており、操作性は da Vinci surgical system と類似していることから、わが国においては da Vinci surgical system に次いで多く、約40台が設置されています。

3) Hugo RAS system

メドトロニックの3法人のひとつであるコヴィディエンジャパン株式会社は、Hugo RAS system の製造販売承認を2022年9月に取得し、11月に保険収載されました。本システムの特徴は、4本のアームが一体化せずそれぞれ独立しており、あらゆる方向からアクセス可能であるため、症例や術式に応じて配置を変えられる設計となっていることです。また、他機種に対して、Hugo は複数人で術野画面を確認できるオープンコンソールを採用していることも特徴のひとつです。

表1 保険収載されている手術支援ロボットを用いた術式

診療科	術式	診療科	術式
耳鼻咽喉科	鏡視下咽頭悪性腫瘍手術 鏡視下喉頭悪性腫瘍手術	外科	腹腔鏡下腓体尾部腫瘍切除術 腹腔鏡下腓頭部腫瘍切除術 腹腔鏡下結腸悪性腫瘍切除術 腹腔鏡下直腸切除・切断術
外科	胸腔鏡下拡大胸腺摘出術 胸腔鏡下縦隔悪性腫瘍手術 胸腔鏡下良性縦隔腫瘍手術 胸腔鏡下肺悪性腫瘍手術 胸腔鏡下食道悪性腫瘍手術 縦郭鏡下食道悪性腫瘍手術 胸腔鏡下弁形成術 腹腔鏡下胃切除術 悪性腫瘍手術 腹腔鏡下噴門側胃切除術 悪性腫瘍手術 腹腔鏡下胃全摘術 悪性腫瘍手術 腹腔鏡下総胆管拡張症手術 腹腔鏡下肝切除術 部分切除	泌尿器科	腹腔鏡下副腎腫瘍摘出術 腹腔鏡下腎悪性腫瘍手術 腹腔鏡下尿管悪性腫瘍手術 腹腔鏡下腎盂形成手術 腹腔鏡下膀胱悪性腫瘍手術 腹腔鏡下前立腺悪性腫瘍手術 腹腔鏡下仙骨腔固定術
		婦人科	腹腔鏡下腔式子宮全摘出術 腹腔鏡下子宮悪性腫瘍手術

4) Saroa surgical system

リバーフィールド株式会社は、東京工業大学と東京医科歯科大学の技術の実用化を目指して2014年に設立され、空気圧超精密制御技術を活かした世界初の空気圧駆動型手術支援ロボットを開発しました。2023年5月に製造販売承認が取得された国内で2台目の手術用内視鏡ロボットです。空気圧駆動技術によって、手術に使用する鉗子にかかる力を検出し、執刀医に触覚（力覚）をフィードバックできます。すなわち、力覚がないことが既存の手術用内視鏡ロボットの欠点とされていましたが、本機種では「力覚」を再現することに成功し、自分の手で直接手術しているような感覚が得られ、手術の精度がより高くなることが期待されています。さまざまなメーカーの内視鏡、モニタおよび電気メス装置を組み合わせることができることも特徴です。

現在の保険適用術式

わが国においては、2012年に前立腺癌に対するロボット支援前立腺全摘除術が、2016年に腎癌に対するロボット支援腎部分切除術が保険収載されたのち、2018年に外科、婦人科手術を含めて12術式、2020年に7術式、2022年に8術式が保険収載され、保険適用術式や

適用疾患が拡大しています。現在保険適用のなっている da Vinci surgical system を用いたロボット支援手術の概略を表1に示します。これらのうち、新規手術用内視鏡ロボットについては、すべてが保険適用になっているわけではありません（表2）。

福島県立医科大学附属病院では、2013年に da Vinci Si surgical system が導入され2018年までは泌尿器科のみがロボット支援手術を行ってきましたが、2019年より外科、婦人科が開始しました。また da Vinci Xi surgical system と da Vinci X surgical system の2台が稼働したことにより、手術件数が劇的に増加し、2022年には年間260件のロボット支援手術を行い、2023年は300件を超えると予想されます。2023年9月現在までの導入後の総手術件数は、1,500例（泌尿器科約1,100例、消化器外科約270例、呼吸器外科約140例、婦人科約50例）を超えており、標準的手術となりました。

おわりに

ロボットという言葉は、Karel Čapek の戯曲『ロボット (R.U.R.)』の中で初めて使われた言葉で、「労働」を意味するチェコ語“robota”が語源とされています。また Wikipedia によるとロボットとは、「人の代わ

表2 本邦で使用可能な手術支援ロボット機種と各診療科の保険収載状況

	da Vinci Xi	da Vinci X	da Vinci SP	hinotori	Hugo	Saroa
泌尿器科	○	○	○	○	○	○
婦人科	○	○	○	○	○	○
消化器外科	○	○	○	○	○	○
呼吸器外科	○	○	○ (肋間アプローチによる手術以外)	未定	未定	○
心臓血管外科	○	○	未定	未定	未定	未定
頭頸部外科	○	○	○ (経口的手術限定)	未定	未定	未定

りになんらかの作業を行う装置の場合、ある程度の工程なり手順なりを自動的かつ連続的に行う物。単一の動作を行う物や、絶えず人間が操作をする必要がある物は基本的にロボットの範疇には含まれない。」とされています。したがって、現在の手術用内視鏡ロボットは人間の操作を必要とするため、厳密な意味からするとロボットの定義から外れることになります。

ロボット支援手術は、設備投資やメンテナンスなどコスト面での問題点が依然として残っていますが、手術時間の短縮、出血量の減少、合併症の減少、入院期間の短縮、早期

社会復帰が見込まれるなど、従来の手術の欠点を補い、低侵襲手術として確立しつつあります。今後さらなる医療工学の発展によりさらに進化することが予想されます。操作性や視認性がさらに改善されるとともに、人工知能が搭載され、確実かつ安全なナビゲーションシステムが開発されることは容易に予想されます。近い将来自動車の自動運転が始まるとされていますが、手術においても医師の力を借りることなく、「真のロボット」がすべて完遂してしまう日が来るのもそれほど遠いことではないかもしれません。

