小児泌尿器科疾患に対する最新治療—ロボット支援手術—

小島 祥敬・松岡香菜子・星 誠二・胡口 智之

佐藤 雄一・小川総一郎・羽賀 宣博

(受付日：平成 30 年 9 月 18 日 採用日：平成 30 年 10 月 10 日)

要 旨

ロボット支援手術は、泌尿器科領域において急速に普及し、特に前立腺癌に対するロボット支援前立腺全摘除術や腎癌に対するロボット支援腎部分切除術は、わが国においても標準的手術となりつつある。手術用ロボット daVinci surgical system は、術者が操作レバーを操ることによって、ロボットアームを遠隔操作することができる。術者は 10 倍以上の拡大視野と遠近感を有した 3 次元画像による手術操作を行うことが可能である。また、ロボットアームの鉗子先端部には、70 度の可動性を有する関節機能および高い自由度を有したエンドリストが装着されており、さらにロボットが有するモーションスケールにより正確かつ繊細な手術操作を行うことが可能になる。小児泌尿器科疾患、特に尿路再建術は、手術用ロボットの特性を生かすことが可能で、今後小児泌尿器科疾患に対するロボット支援手術の確立が期待されている。

序 言

ロボット支援手術は、現在欧米では、特に前立腺癌に対する根治的前立腺全摘除術や小径腎癌に対する腎部分切除術において標準的手術として位置づけられている。わが国においては、2012 年 4 月にロボット支援前立腺全摘除術が、2017 年 4 月にロボット支援腎部分切除術が保険収載されたのを契機に急速に普及し、標準的手術として確立しつつある¹⁾。

小児泌尿器科疾患に対する手術は、開放手術が標準的

手術であったが、最近になって、腹腔鏡下で広く行われるようになり、私たちもこれまでにその手術成績を報告してきた²⁾⁻¹¹⁾。しかし、小児に対する腹腔鏡下手術はその技術の難易度から、わが国においては必ずしも十分普及しているとはいえない。一方、小児泌尿器科疾患、特に尿路再建術は、手術用ロボットの特性を生かすことが可能で、今後小児泌尿器科疾患に対するロボット支援手術の確立が期待されている¹²⁾。

本稿では、ロボット支援手術、特に小児に対するロボット支援手術の現況と、今後の未来展望について概説した。

1. 小児に対する腹腔鏡下手術の普及とその限界

泌尿器科領域において、1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて、腹腔鏡下手術は広く普及し、特に副腎腫瘍に対する腹腔鏡下副腎摘除術、腎癌に対する腹腔鏡下根治的腎摘除術および腎部分切除術、前立腺癌に対する腹腔鏡下根治的前立腺全摘除術が確立した。また最近では、膀胱癌に対する根治的膀胱全摘除術や、女性の骨盤内臓器脱に対する腹腔鏡下仙骨陰固定術が保険適用となり、泌尿器科領域の手術の多くが、腹腔鏡下手術に置き換わった。

小児泌尿器科疾患においては、萎縮腎に対する腎摘除術、重複腎盂尿管に対する上位腎摘除術、腎盂尿管移行部通過障害に対する腹腔鏡下腎盂形成術、膀胱尿管逆流に対する気膀胱下逆流防止術、停留精巣に対する腹腔鏡下精巣固定術や摘除術などが保険適用であるものの、その難易度のため必ずしも多くの施設に普及しているとはいえない。

腹腔鏡下手術の利点として、患者にとって傷が小さく審美性に優れることや、術後疼痛が少ないこと、出血が

福島県立医科大学医学部泌尿器科学講座
連絡著者：〒960-1295 福島市光が丘 1 番地
福島県立医科大学医学部泌尿器科学講座 小島祥敬
E-mail: ykojima@fmu.ac.jp
doi.org/10.3165/jjpn.rv.2018.0004

Key words: 小児泌尿器科 / ロボット支援手術 / 腎盂尿管移行部通過障害 / 膀胱尿管逆流

少なく術後回復期間や入院期間が短いことがあげられる。また医師側からすれば、拡大・広範囲な視野を確保でき、real-timeの視野を共有できることがあげられる。これらは、特に小児泌尿器科疾患に対しては、非常に大きな利点である。しかし一方で、腹腔鏡下手術の欠点として、カメラ操作を助手にゆだねる必要があること、2次元画像による手術であること、そして手術の技術習得に時間がかかることがあげられる。特に小児泌尿器疾患に対する尿路再建術に必要な縫合操作が非常に難易度の高いことは最大の欠点であり、わが国においてそれほど普及していない原因と考えられている。

2. ロボット支援手術の歴史と現状

ロボット支援手術は、ロボット支援前立腺全摘除術を皮切りに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た¹³⁾¹⁴⁾。開発当初の手術用ロボット da Vinci surgical system(いわゆる standard da Vinci と呼ばれるもので、現在用いられているものの原型となったもの)は、当初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た。しかしシステムそのものが成熟しているとはいえず、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なかった。しかしわが国においても第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た。さらに第3世代の da Vinci Si surgical system(図1)、第4世代の da Vinci Xi surgical system が登場し、現在わが国の設置台数は250台を超えている。それに伴い、2017年4月には、腎癌に対するロボット支援腎部分切除術が保険適応になったのち、2018年4月には、泌尿器科手術のみならず、12の手術(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、胸腔鏡下弁形成術、腹腔鏡下胃切除術、腹腔鏡下噴門側胃切除術、腹腔鏡下胃全摘術、腹腔鏡下直腸切除・切断術、腹腔鏡下膀胱悪性腫瘍手術、腹腔鏡下子宮悪性腫瘍手術、腹腔鏡下膣式子宮全摘術)が新たに適用となり、わが国においても、ようやくロボット手術時代が到来したといってもよい。

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)の三つの装置に分けられる。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った。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る。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可能になる。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、従来の腹腔鏡手術にない利点を有している。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により、細かい吻合操作や剝離操作が、人の手より格段に正確に行うことができる。ロボットアームは3本あり、これらを巧みに使い分けることにより、よりよい視野を確保することが可能である。

さらに、手術ビデオを使った手術のトレーニングや、da Vinci Si surgical system 以降、デュアルコンソールやスキルシミュレーターによる術者教育の充実に図られ、開放手術や腹腔鏡下手術に比べ、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あげられる。

3. 小児泌尿器科領域におけるロボット支援手術

上述したロボット支援手術の特徴からすれば、ロボット支援手術を小児泌尿器科疾患に応用しようとする試みがなされるのは当然の流れで、米国を中心に急速に適応が拡大された。これまで報告のある小児に対するロボット支援手術は、上位腎摘除術、腎盂形成術、腎杯尿管吻合術、尿管尿管吻合術、逆流防止術、虫垂導尿路造設術、膀胱拡大術など多岐にわたる^{15)~18)}。2003~2015年に米国で行われた腎盂形成術は11,899件で、開放手術75%、腹腔鏡下手術10%、ロボット支援手術15%であり、ロボット支援手術の増加率が最も多いことが報告されており¹⁹⁾、米国では普及が進んでいることが明らかである。しかしながら、本邦では小児疾患に対するロボット支援手術は保険収載されているものがないため、ほとんど行われていないのが現状である。

本稿では、特に小児泌尿器科疾患の中で、最も一般的な疾患である腎盂尿管移行部通過障害(先天性水腎症)に対するロボット支援腎盂形成術、および膀胱尿管逆流に

図 1 da Vinci surgical system

(A)サージョンコンソール (B)医師はサージョンコンソールを操作して鉗子を動かす。(C)Foot switchにて電気メス操作, カメラ操作を行う。

対するロボット支援逆流防止術について文献的に考察した。

1) 腎盂尿管移行部通過障害に対するロボット支援腎盂形成術(図 2)

ロボット支援手術は、人の手よりも縫合が正確にでき

ることから、腎盂と尿管の正確な吻合が必要とされる小児腎盂形成術において有力な選択肢の一つとなりうる。海外の報告では手術成績も 93.9~100%と良好である^{20)~25)}。本邦における後方視的研究においても、開放手術、腹腔鏡下手術、ロボット支援手術の間に、手術成績に違いはないと報告されている²⁶⁾。

図2 ロボット支援腎盂形成術
(A)尿管の切開 (B)腎盂尿管の吻合

海外では、手術適応年齢も低下傾向にあり、Kutikovらは、生後3～8か月までの9人の乳児に対しロボット支援腎盂形成術を施行し、体腔内での可動域の制限はあるものの、乳児に対しても十分可能であることを報告している²⁰⁾。同様にBansalらも、生後3～12か月の乳児に腎盂形成術を含めたロボット支援上部尿路再建術を安全に施行できたと報告している²⁷⁾。乳児に対するロボット支援手術は技術的には可能であるが、その有用性は十分なエビデンスがあるとはいえず²⁸⁾、現時点では現実的には適応症例としては10 kg以上の患児が推奨される。

Atugらは、7例の小児症例(平均年齢13歳)に対しロボット支援腎盂形成術を施行し、平均手術時間184分、平均在院日数1.2日、追加治療が必要な患児はいなかったことを報告している²¹⁾。さらにOlsenらは、65例の患児(平均年齢7.9歳)に対しロボット支援腎盂形成術を後腹膜到達法により施行し、平均手術時間143分、平均在院日数2.0日、成功率は94%と報告している²²⁾。最近の報告では手術時間もさらに短縮し、平均手術時間105分、平均吻合時間46.5分で、手術の成功率も97%と高い²³⁾。

また、再発例に対するロボット支援腎盂形成術の報告

もある^{29)–31)}。Lindgrenらは、16例(開放手術術後12例、ロボット支援手術術後4例)の再発例に対しロボット支援腎盂形成術を施行し、88%の成功率であったと報告している²⁹⁾。

開放手術とロボット支援手術の手術成績を比較した報告は3報存在する²⁴⁾²⁵⁾³²⁾。Yeeらは、開放手術、ロボット支援手術の手術時間はそれぞれ248分、363分、出血量は53.8 ml、13.1 ml、入院期間は3.3日、2.4日であり、手術の成功率はいずれも100%であったと報告している²⁴⁾。同様に、Leeらは開放手術とロボット支援手術を後向きに比較し、平均手術時間は開放手術181分に対しロボット支援腎盂形成術は219分と、有意に開放手術のほうが短かったのに対し、入院期間は開放手術3.5日に対し、ロボット支援手術2.3日と、ロボット支援手術のほうが短かったと報告している²⁵⁾。また術後疼痛緩和薬の使用もロボット支援手術で有意に少なかった。手術の成功率は開放手術では100%であったのに対し、ロボット支援手術では93.9%であったと報告している²⁵⁾。Dangleらは、開放手術(平均3.31か月)とロボット支援手術(平均7.3か月 $p=0.02$)の手術成績を比較し、入院日

数(2.2 vs 2.1 日), 推定出血量(6.5 vs 7.6 ml), 食事開始(1 vs 1.1), 尿道カテーテル抜去(1.3 vs 1.3), 水腎症の改善, 費用に差はなかったが, 総手術時間(199 vs 242 分)は, ロボット支援手術において有意に長かったと報告している³²⁾。

Sukumar らは, Nationwide Inpatient Sample に登録された, 19 歳以下の小児腎盂尿管移行部通過障害患者 35,275 例を用いて, 開放腎盂形成術, 経皮的腎盂切開術, 腹腔鏡下腎盂形成術, ロボット支援腎盂形成術の有用性について比較検討を行っている。2007 年より腹腔鏡下腎盂形成術, ロボット支援腎盂形成術の数が増加しており, 2008~2010 年には全体の 16.9% 占めていたと報告している³³⁾。ロボット支援腎盂形成術は, 開放手術と比較して, 術中・術後合併症は同等で, 入院日数は短いものの, 輸血の確率が高くコストはより高い術式であると報告している³³⁾。

Varda らは米国における 2003~2010 年の Premier Perspectives Database を用いた集団ベース研究で, 開放腎盂形成術の減少と, 腹腔鏡下腎盂形成術およびロボット支援腎盂形成術の増加を認め, いずれの手術も合併症は低かったと報告している。また, 開放手術に比較して, 腹腔鏡下手術およびロボット支援手術では入院期間に差はなかったものの手術時間が長いこと, ロボット支援手術では, コストが高いことを報告している³⁴⁾。

ロボット支援手術と開放手術を受けた患児の両親の満足度は, 特に審美性や術後回復の点でロボット支援手術の方が良好であったとの報告もある³⁵⁾。また患者の両親も患児も, 開放腎盂形成術の術後瘢痕よりもロボット支援腎盂形成術の術後瘢痕を好み, 審美性の観点からもロボット支援手術の優位性があると考えられる³⁶⁾。

以上のことから, ロボット支援腎盂形成術は, 開放腎盂形成術と比較して, 手術時間は長くコストもかかるが, 入院期間が短く, 審美性に優れ, 疼痛も少ない低侵襲手術と考えられる。

一方, 腹腔鏡手術との比較も最近報告されている。Riachy らは, ロボット支援手術の平均手術時間(209 分)は腹腔鏡手術(298 分)に比較して短いものの, 入院期間, 疼痛緩和薬の使用頻度, 手術成績は両術式に有意差を認めなかったと報告している³⁷⁾。Casella らは, ロボット支援手術(平均手術時間 200 分)と腹腔鏡手術(265 分)のコストについて比較し, 両群間に有意差を認めなかったと報告しており, さらなる手術時間の短縮とロボット支援手術の普及により, 小児においては腹腔鏡下手術からロボット支援手術に置き換わる可能性があるとして述べてい

る³⁸⁾。

最近の年齢をマッチさせた開放手術, 腹腔鏡下手術, ロボット支援手術を比較した後方視的検討では, 手術成績には差はないが, ロボット支援手術では, 入院期間が有意に短く, 鎮痛薬使用回数も有意に少なかったと報告している³⁹⁾。

2016 年に日本小児泌尿器科学会から発刊された小児先天性水腎症(腎盂尿管移行部通過障害)診療手引き 2016 では, ロボット支援腎盂形成術は, “標準に準拠すると考えられるが, 未承認・保険適用がないもの”という位置づけである⁴⁰⁾。

2) 膀胱尿管逆流に対するロボット支援逆流防止術(図 3)

膀胱尿管逆流に対しては, 古典的な開放手術に加えて, 最近では内視鏡手術が特に low grade の症例に対しては一般化しつつある。その中で, 腹腔鏡下手術が登場し, これまでその有用性についての報告は多く認めるが, 他の手術と同様難易度の高い手術である。それに対してロボット支援手術は腹腔鏡下手術の欠点を補い, 近年報告が相次いでいる。ロボット支援手術においても, 腹腔鏡下手術と同様, 気膀胱下による膀胱内操作手術(主に Cohen 法)と経腹膜到達法による膀胱外操作手術(主に Lich-Gregoir 法)が報告されている。膀胱内操作手術は有用であるとの報告もあるが, 膀胱容量が 130 ml 以下の乳幼児症例には適さず¹⁵⁾⁻¹⁸⁾, 本稿では割愛した。最近では, 他の尿路合併症や psoas hitch 法, 巨大尿管に対する手術などに応用されている⁴¹⁾⁻⁴⁴⁾。

膀胱外操作による逆流防止術の利点は, 術後血尿や膀胱刺激症状が少ないことにある。またより正常に近い解剖学的構造をとどめるため, 将来内視鏡下の尿管結石治療などの逆行性操作に不具合を生じない。このことは開放手術と同様ロボット支援手術においても同様のことと考えられる。

Casale らは, 41 例の両側膀胱尿管逆流に対してロボット支援逆流防止術を施行し, 97.6%の成功率であったと報告している⁴⁵⁾。Gundeti らは手術術式の改良により, さらなる逆流消失率の改善を認めたと報告している⁴⁶⁾。最近の前向き多施設共同研究では, 逆流消失率が 93.8%, 術後合併症が 2.5%であったと報告している⁴⁷⁾。

Smith らは, ロボット支援逆流防止術(Lich-Gregoir 法)と開放手術による逆流防止術(Cohen 法)を比較し, 成功率はロボット支援手術 97%, 開放手術 100%と有意差はなく, 平均手術時間は開放手術に比較してロボット支援手術では 12%長いものの, 入院期間や疼痛緩和薬の使用

図3 ロボット支援逆流防止術
(A)膀胱筋層の切開 (B)尿管の膀胱粘膜下への縫合

回数はロボット支援手術のほうが少なかったと述べている⁴⁸⁾。Marchini らは膀胱外操作によるロボット支援手術と開放手術の手術成績を比較し、手術時間はそれぞれ233分、120分であるものの、痛みや膀胱刺激症状の頻度、尿道カテーテルの留置期間、入院期間には有意な差は認めなかったと報告している⁴⁹⁾。一方、Kurtz らは、Premier Hospital Database を用いて、2003～2013年に行われた17病院における開放手術とロボット支援手術の手術成績を比較したところ、ロボット支援手術においてコストが高いという問題のみならず、術後合併症が多かったとの報告をしており、特にロボット支援手術の経験が少ない施設に対する注意喚起をしている⁵⁰⁾。

最近の多施設共同研究では、逆流消失率87.9%で、合併症は9.6%、そのうちgrade3の合併症は2.7%で、grade4および5の合併症は認めなかったと報告している⁵¹⁾。また、6研究7,122例を対象としたsystematic reviewでは、ロボット支援手術は開放手術に比べて、手術

時間は長い、在院日数やカテーテル留置期間が短いと結論づけている。一方、出血量、成功率、合併症、鎮痛剤使用回数には有意差を認めなかったと報告している⁵²⁾。米国のKids' Inpatient Databaseによると、2000～2012年に14,581尿管に対して逆流防止術がなされており、腹腔鏡下手術・ロボット支援手術は0.3%から6.3%に増加、ロボット支援手術に限定すれば、2009年3.8%から2012年5.1%に増加していたと報告している。2009～2012年でのロボット支援手術と開放手術の比較では、それぞれ平均年齢5.7歳、4.3歳、在院日数1.6日、2.4日、コストは\$32,409、\$22,703と報告されている⁵³⁾。

腹腔鏡下手術との比較をした本邦からの報告では、逆流消失率には有意差がなく、腹腔鏡手術とロボット支援手術の手術時間はそれぞれ、片側例で192.5分、144.0分、両側例で227.0分、211.5分と、ロボット支援手術で短い傾向が見られたと報告している⁵⁴⁾。

Lich-Gregoir法の問題点として、両側例に行った場合

術後排尿困難を生じることが報告されている。ロボット支援手術においても同様に報告がなされている。Smithらは3例の尿閉例を⁴⁸⁾、Marchiniらは20例中2例の尿閉例を報告しているが⁴⁹⁾、いずれも一時的なものである。最近の260例を解析した多施設共同研究では、3.9%に発症したと報告している⁵¹⁾。一方Casaleらは、41例の両側例に対してロボット支援逆流防止術を施行したが、尿閉例や排尿困難例は認めなかったと報告している⁴⁵⁾。上述したように、術後尿閉や排尿困難を回避するためには、骨盤内の神経支配の解剖学的理解が重要と考えられる。ロボット支援手術においては、高解像度3D画像により神経の走行が非常に鮮明に観察され、これら神経の走行に注意しながら手術を行うことによって、術後排尿困難は回避できると考えられる。

ロボット支援腎盂形成術と同様に、2016年に日本小児泌尿器科学会から発刊された小児膀胱尿管逆流(VUR)診療手引き2016では、ロボット支援逆流防止術は、“標準に準拠すると考えられるが、未承認・保険適用がないもの”という位置づけである⁵⁵⁾。

4. 小児ロボット支援手術の未来展望

小児泌尿器疾患にロボット支援手術を応用する場合、克服すべき諸問題が存在する。まず現存する手術支援用ロボットは大人用(直径8 mm 鉗子)であり、小児特に乳幼児にとってはやや大きすぎる。最近では5 mm 鉗子を用いてロボット支援腎盂形成術を行ったとの報告もあり⁵⁶⁾、この点は今後改善されるであろう。また、原則として体重10 kg以下の患児は対象外とされており、乳幼児の多くは適応外となる。さらにコストが高く、手術支援用ロボットが1社独占状態にあることも起因している。現在わが国を含め、世界中で手術支援ロボットの開発が進んでおり、今後が期待される。また、小児泌尿器科疾患に対するロボット支援手術は、現状では保険適用外であり、この点はコストの問題がある程度解決すれば適用が拡大されるかもしれない。

小児泌尿器科領域においては多くの尿路再建術があり、特に腎盂尿管移行部通過障害に伴う水腎症に対する腎盂形成術、膀胱尿管逆流症に対するロボット支援手術のみならず、神経因性膀胱などの小児泌尿器科疾患に対する尿路再建術や複雑な尿路奇形に対する手術が、欧米においてはロボット支援下に行われるようになっていく²⁵⁾⁻²⁸⁾。これらは細い縫合糸を用いて、より正確な尿路再建が低侵襲で行われる。今後近い将来わが国においても、上記諸問題が解決され一般的手術として普及する

ことが期待される。

結 語

小児泌尿器科疾患に対するロボット支援手術の現況と未来展望について概説した。現在わが国は世界第2位の手術用ロボット保有国となった。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るが、従来の手術の欠点を補う最先端医療であることは間違いない。小児に対しても適切な先端的な手術用ロボットの開発がさらに進められ、多くの泌尿器科疾患を有する患児に、より安心安全な医療を提供できることを期待したい。

「日本小児腎臓病学会の定める基準に基づく利益相反に関する開示事項はありません。」

文 献

- 1) 小島祥敬：ロボット支援下手術の現況と未来展望. 泌尿器外科 2013; 26: 401-402.
- 2) Kojima Y, Mizuno K, Umemoto Y, Yasui T, Hayashi Y, Kohri K: Ureteral advancement in patients undergoing laparoscopic extravesical ureteral reimplantation for treatment of vesicoureteral reflux. J Urol 2012; 188: 582-587.
- 3) Mizuno K, Kojima Y, Nishio H, Tozawa K, Mizuno H, Kohri K, Hayashi Y: Transumbilical laparoendoscopic single-site gonadectomy for Turner's syndrome with Y-chromosome mosaicism. J Pediatr Urol 2012; 8: e39-42.
- 4) Kojima Y, Mizuno K, Kamisawa H, Kato T, Kohri K, Hayashi Y: Laparoscopic management of nonpalpable testis: new treatment strategy. J Endourol 2011; 25: 635-640.
- 5) Kojima Y, Umemoto Y, Mizuno K, Tozawa K, Kohri K, Hayashi Y: Comparison of laparoscopic pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction in adults and children: lessons learned. J Urol 2011; 185: 1461-1467.
- 6) Nishio H, Kojima Y, Mizuno K, Kamisawa H, Kohri K, Hayashi Y: Laparoscopic nephrectomy for pelvic multicystic dysplastic kidney. Urology 2011; 78: 434-436.
- 7) Kojima Y, Tozawa K, Kohri K, Hayashi Y: Laparoscopic reconstructive surgery in pediatric urology: An overview of current options. Curr Pediatr Rev 2010; 6: 156-165.
- 8) Iwatsuki S, Kojima Y, Mizuno K, Tozawa K, Kohri K, Hayashi Y: Laparoscopic management for fibroepithelial polyp causing ureteropelvic junction obstruction in a child. Urology 2010; 76: 146-148.
- 9) Kojima Y, Sasaki S, Mizuno K, Tozawa K, Hayashi Y, Kohri K: Laparoscopic dismembered pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction in children. Int J Urol 2009; 16: 472-476.
- 10) Mizuno K, Kojima Y, Kurokawa S, Mizuno H, Kohri K, Hayashi Y: Laparoscopic diagnosis and treatment of a phenotypic girl with a mosaic 45,XO/46,X,idic(Y) mixed gonadal dysgenesis. J Pediatr Surg 2009; 44: e1-3.
- 11) Kojima Y, Mizuno K, Imura M, Kato T, Kohri K, Hayashi Y: Laparoscopic orchiectomy and subsequent internal ring closure for extra-abdominal testicular nubbin in children. Urology 2009; 73:

- 515-519; discussion 519-520.
- 12) 小島祥敬, 秦 淳也, 佐藤雄一, 赤井畑秀則, 羽賀宣博, 林祐太郎, 黒川覚史, 水野健太郎, 郡健二郎: ロボット支援下尿路再建術. 日小児泌会誌 2013; 22: 51-57.
 - 13) Tewari A, Peabody J, Sarle R, Balakrishnan G, Hemal A, Shrivastava A, Menon M: Technique of da Vinci robot-assisted anatomic radical prostatectomy. *Urology* 2002; 60: 569-572.
 - 14) Menon M, Shrivastava A, Tewari A, Sarle R, Hemal A, Peabody JO, Vallancien G: Laparoscopic and robot assisted radical prostatectomy: establishment of a structured program and preliminary analysis of outcomes. *J Urol* 2002; 168: 945-949.
 - 15) Kojima Y, Casale P: Pediatric robotic (infant, pre-pubertal and teenager) pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction, in *Laparoscopic reconstructive surgery in children and adults*, edited by Ost MC. Humana Press, New York, USA, 2010; 109-124.
 - 16) Casale P, Kojima Y: Robotic-assisted laparoscopic surgery in pediatric urology: an update. *Scand J Surg* 2009; 98: 110-119.
 - 17) Casale P, Kojima Y: Pediatric robotic urology. *American urological association update series*. 2009; 31: 285-292.
 - 18) Gundeti MS, Kojima Y, Haga N, Kiriluk K: Robotic-assisted laparoscopic reconstructive surgery in the lower urinary tract. *Curr Urol Rep* 2013; 14: 333-341.
 - 19) Varda BK, Wang Y, Chung BI, Lee RS, Kurtz MP, Nelson CP, Chang SL: Has the robot caught up? National trends in utilization, perioperative outcomes, and cost for open, laparoscopic, and robotic pediatric pyeloplasty in the United States from 2003 to 2015. *J Pediatr Urol*. 2018. pii: S1477-5131(18)30023-8. doi: 10.1016/j.jpuro.2017.12.010.
 - 20) Kutikov A, Nguyen M, Guzzo T, Canter D, Casale P: Robot assisted pyeloplasty in the infant-lessons learned. *J Urol* 2006; 176: 2237-2239; discussion 2239-2240.
 - 21) Atug F, Woods M, Burgess SV, Castle EP, Thomas R: Robotic assisted laparoscopic pyeloplasty in children. *J Urol* 2005; 174: 1440-1442.
 - 22) Olsen LH, Rawashdeh YF, Jorgensen TM: Pediatric robot assisted retroperitoneoscopic pyeloplasty: a 5-year experience. *J Urol* 2007; 178: 2137-2141; discussion 2141.
 - 23) Singh P, Dogra PN, Kumar R, Gupta NP, Nayak B, Seth A: Outcomes of robot-assisted laparoscopic pyeloplasty in children: a single center experience. *J Endourol* 2012; 26: 249-253.
 - 24) Yee DS, Shanberg AM, Duel BP, Rodriguez E, Eichel L, Rajpoot D: Initial comparison of robotic-assisted laparoscopic versus open pyeloplasty in children. *Urology* 2006; 67: 599-602.
 - 25) Lee RS, Retik AB, Borer JG, Peters CA: Pediatric robot assisted laparoscopic dismembered pyeloplasty: comparison with a cohort of open surgery. *J Urol* 2006; 175: 683-687; discussion 687.
 - 26) Mizuno K, Kojima Y, Kurokawa S, Kamisawa H, Nishio H, Moritoki Y, Nakane A, Maruyama T, Okada A, Kawai N, Tozawa K, Kohri K, Yasui T, Hayashi Y: Robot-assisted laparoscopic pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction: comparison between pediatric and adult patients-Japanese series. *J Robot Surg* 2017; 11: 151-157.
 - 27) Bansal D, Cost NG, Bean CM, Vanderbrink BA, Schulte M, Noh PH: Infant robot-assisted laparoscopic upper urinary tract reconstructive surgery. *J Pediatr Urol* 2014; 10: 869-874.
 - 28) Spinoit AF, Nguyen H, Subramaniam R: Role of robotics in children: a brave new world! *Eur Urol Focus* 2017; 3: 172-180.
 - 29) Lindgren BW, Hagerty J, Meyer T, Cheng EY: Robot-assisted laparoscopic reoperative repair for failed pyeloplasty in children: a safe and highly effective treatment option. *J Urol* 2012; 188: 932-937.
 - 30) Passerotti CC, Nguyen HT, Eisner BH, Lee RS, Peters CA: Laparoscopic reoperative pediatric pyeloplasty with robotic assistance. *J Endourol* 2007; 21: 1137-1140.
 - 31) Hemal AK, Mishra S, Mukharjee S, Suryavanshi M: Robot assisted laparoscopic pyeloplasty in patients of ureteropelvic junction obstruction with previously failed open surgical repair. *Int J Urol* 2008; 15: 744-746.
 - 32) Dangle PP, Kearns J, Anderson B, Gundeti MS: Outcomes of infants undergoing robot-assisted laparoscopic pyeloplasty compared to open repair. *J Urol* 2013; 190: 2221-2226.
 - 33) Sukumar S, Roghmann F, Sood A, Abdo A, Menon M, Sammon JD, Sun M, Varda B, Trinh QD, Elder JS: Correction of ureteropelvic junction obstruction in children: national trends and comparative effectiveness in operative outcomes. *J Endourol* 2014; 28: 592-598.
 - 34) Varda BK, Johnson EK, Clark C, Chung BI, Nelson CP, Chang SL: National trends of perioperative outcomes and costs for open, laparoscopic and robotic pediatric pyeloplasty. *J Urol* 2014; 191: 1090-1095.
 - 35) Freilich DA, Penna FJ, Nelson CP, Retik AB, Nguyen HT: Parental satisfaction after open versus robot assisted laparoscopic pyeloplasty: results from modified Glasgow Children's Benefit Inventory Survey. *J Urol* 2010; 183: 704-708.
 - 36) Barbosa JA, Barayan G, Gridley CM, Sanchez DC, Passerotti CC, Houck CS, Nguyen HT: Parent and patient perceptions of robotic vs open urological surgery scars in children. *J Urol* 2013; 190: 244-250.
 - 37) Riachy E, Cost NG, Defoor WR, Reddy PP, Minevich EA, Noh PH: Pediatric standard and robot-assisted laparoscopic pyeloplasty: a comparative single institution study. *J Urol* 2013; 189: 283-287.
 - 38) Casella DP, Fox JA, Schneck FX, Cannon GM, Ost MC: Cost analysis of pediatric robot-assisted and laparoscopic pyeloplasty. *J Urol* 2013; 189: 1083-1086.
 - 39) Song SH, Lee C, Jung J, Kim SJ, Park S, Park H, Kim KS: A comparative study of pediatric open pyeloplasty, laparoscopy-assisted extracorporeal pyeloplasty, and robot-assisted laparoscopic pyeloplasty. *PLoS ONE* 2017; 12: e0175026.
 - 40) 日本小児泌尿器科学会診療の手引き作成委員会編. 小児先天性水腎症(腎盂尿管移行部通過障害)診療手引き 2016. 日小児泌会誌 2016; 25: 4-46.
 - 41) Lee RS, Sethi AS, Passerotti CC, Peters CA: Robot-assisted laparoscopic nephrectomy and contralateral ureteral reimplantation in children. *J Endourol* 2010; 24: 123-128.
 - 42) Patil NN, Mottrie A, Sundaram B, Patel VR: Robotic-assisted laparoscopic ureteral reimplantation with psoas hitch: a multi-institutional, multinational evaluation. *Urology* 2008; 72: 47-50; discussion 50.
 - 43) Goh AC, Link RE: Robot-assisted tapered ureteral reimplantation for congenital megaureter. *Urology* 2011; 77: 742-745.
 - 44) Hemal AK, Nayyar R, Rao R: Robotic repair of primary symptomatic obstructive megaureter with intracorporeal or extracorporeal ureteric tapering and ureteroneocystostomy. *J Endourol* 2009; 23: 2041-2046.
 - 45) Casale P, Patel RP, Kolon TF: Nerve sparing robotic extravesical ureteral reimplantation. *J Urol* 2008; 179: 1987-1989; discussion 1990.
 - 46) Gundeti MS, Boysen WR, Shah A: Robot-assisted Laparoscopic Extravesical Ureteral Reimplantation: Technique Modifications

- Contribute to Optimized Outcomes. *Eur Urol* 2016; 70: 818-823.
- 47) Boysen WR, Akhavan A, Ko J, Ellison JS, Lendvay TS, Huang J, Garcia-Roig M, Kirsch A, Koh CJ, Schulte M, Noh P, Monn MF, Whittam B, Kawal T, Shukla A, Srinivasan A, Gundeti MS: Prospective multicenter study on robot-assisted laparoscopic extravesical ureteral reimplantation (RALUR-EV): Outcomes and complications. *J Pediatr Urol* 2018; 14: 262. e1-262.
 - 48) Smith RP, Oliver JL, Peters CA: Pediatric robotic extravesical ureteral reimplantation: comparison with open surgery. *J Urol* 2011; 185: 1876-1881.
 - 49) Marchini GS, Hong YK, Minnillo BJ, Diamond DA, Houck CS, Meier PM, Passerotti CC, Kaplan JR, Retik AB, Nguyen HT: Robotic assisted laparoscopic ureteral reimplantation in children: case matched comparative study with open surgical approach. *J Urol* 2011; 185: 1870-1875.
 - 50) Kurtz MP, Leow JJ, Varda BK, Logvinenko T, Yu RN, Nelson CP, Chung BI, Chang SL: Robotic versus open pediatric ureteral reimplantation: Costs and complications from a nationwide sample. *J Pediatr Urol* 2016; 12: 408. e1-408.
 - 51) Boysen WR, Ellison JS, Kim C, Koh CJ, Noh P, Whittam B, Palmer B, Shukla A, Kirsch A, Gundeti MS: Multi-institutional review of outcomes and complications of robot-assisted laparoscopic extravesical ureteral reimplantation for treatment of primary vesicoureteral reflux in children. *J Urol* 2017; 197: 1555-1561.
 - 52) Deng T, Liu B, Luo L, Duan X, Cai C, Zhao Z, Zhu W, Wu W, Zeng G: Robot-assisted laparoscopic versus open ureteral reimplantation for pediatric vesicoureteral reflux: a systematic review and meta-analysis. *World J Urol* 2018; 36: 819-828.
 - 53) Bowen DK, Faasse MA, Liu DB, Gong EM, Lindgren BW, Johnson EK: Use of pediatric open, laparoscopic and robot-assisted laparoscopic ureteral reimplantation in the United States: 2000 to 2012. *J Urol* 2016; 196: 207-212.
 - 54) Hayashi Y, Mizuno K, Kurokawa S, Nakane A, Kamisawa H, Nishio H, Moritoki Y, Tozawa K, Kohri K, Kojima Y: Extravesical robot-assisted laparoscopic ureteral reimplantation for vesicoureteral reflux: initial experience in Japan with the ureteral advancement technique. *Int J Urol* 2014; 21: 1016-1021.
 - 55) 日本小児泌尿器科学会診療の手引き作成委員会編. 小児膀胱尿管逆流 (VUR) 診療手引き 2016. 日小児泌会誌 2016; 25: 50-94.
 - 56) Baek M, Silay MS, Au JK, Huang GO, Elizondo RA, Puttmann KT, Janzen NK, Seth A, Roth DR, Koh CJ: Does the use of 5 mm instruments affect the outcomes of robot-assisted laparoscopic pyeloplasty in smaller working spaces? A comparative analysis of infants and older children. *J Pediatr Urol* 2018. pii: S1477-5131(18) 30337-1. doi: 10.1016/j.jpuro.2018.06.010.

A state-of-the-art pediatric urology: robot-assisted surgery

Yoshiyuki Kojima, Kanako Matsuoka, Seiji Hoshi, Tomoyuki Koguchi,
Yuichi Sato, Soichiro Ogawa, Nobuhiro Haga

Department of Urology, Fukushima Medical University School of Medicine

Recently, robot-assisted surgery has gained popularity in urological field and especially, robot-assisted radical prostatectomy for localized prostate cancer and robot-assisted partial nephrectomy for small kidney cancer has been established as gold standard in Japan. The daVinci surgical system (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA, USA) provides the advantages of simplification and precision of exposure and suturing because of allowing movements of the robotic arm in real time with increased degree of freedom and magnified 3-dimensional view. These main advantages of robot-assisted surgery are expected to be applied to pediatric urology patients. In this review, we discuss the recent advances in robot-assisted reconstruction surgery in pediatric urology, such as pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction and ureteral reimplantation for vesicoureteral reflux, and provide a critical summary of current knowledge on its outcome. In conclusion, urological reconstruction surgery for children could be replaced with robot-assisted surgery, which may be established as minimally invasive surgery in the future.

Key words: pediatric urology, robot-assisted surgery, ureteropelvic junction obstruction, vesicoureteral reflux