

## 臨床トピックス

# 泌尿器科手術におけるロボット支援手術の近未来 －遠隔手術・自律化・データ外科が再定義する外科医療－

高原 健\*

## はじめに

ロボット支援手術はこの20年で泌尿器科領域における外科治療のパラダイムを大きく変化させた。特にロボット支援前立腺全摘除術や腎部分切除術に代表される低侵襲手術においては、三次元高精細視野と多関節機構を備えた手術支援ロボットの導入により、従来の腹腔鏡手術では困難であった精緻な操作が可能となった。その結果、出血量の低減、周術期合併症の減少、在院日数の短縮といった周術期成績の改善に加え、尿禁制(尿を適切に保持し、尿失禁を認めない状態)や性機能といった術後機能の温存率の向上が報告されている<sup>1,2)</sup>。これらのエビデンスに基づき、ロボット支援手術は現在、泌尿器科領域における標準術式として広く普及し、外科医療の質の均てん化にも一定の役割を果たしている。

しかしながら、現行のロボット手術システムは術者の操作を遠隔的に再現するマスター・スレーブ型(術者の操作入力をロボットが追従・再現する制御方式)に基づくものであり、その本質は人間の手技の延長に過ぎない。ロボットは術者の視覚および操作能力を拡張する「高度なツール」であるが、自律的に状況を認識し意思決定を

行う主体ではない。この観点から、現在のロボット支援手術は完成形ではなく、さらなる進化の途上にあると位置づけられる。近年、この進化を方向付ける三つの重要な潮流として、「遠隔手術(telesurgery)」、「人工知能(AI)による自律化」、「データ駆動型外科」が挙げられる。

## I. 遠隔手術(telesurgery)

遠隔手術の概念は2001年に報告された大西洋横断遠隔手術、いわゆるLindbergh手術に端を発する<sup>3)</sup>。この手術ではフランス・ストラズブールの患者に対してニューヨークから外科医がロボットを操作し胆嚢摘出術を成功させた。この成果は外科医療における地理的制約の克服という新たな可能性を示したものであった。しかし当時は通信遅延や回線の不安定性、高額な通信コストといった問題が大きな障壁となり、臨床応用は限定的であった。その後、通信技術は飛躍的な進歩を遂げ、特に5G通信や高速光ファイバー網の整備により、低遅延かつ高信頼な通信環境が実現しつつある。近年では数万キロメートル規模の長距離遠隔手術の実証が成功しており、術者と患者の物理的距離という障壁は急速に希薄化している。

遠隔手術の発展は、医療提供体制に構造的変革をもたらす可能性を有する。従来、高度医療は都市部の大規模施設に集中していたが、遠隔手術の普及により専門医の技術を、地理的制約を超えて提供することが可能となる。特に専門

— Key words —

ロボット支援手術, 遠隔手術, 自律化, データ外科

\* Kiyoshi Takahara: 藤田医科大学 医学部 腎泌尿器科 主任教授

## 泌尿器科ロボット手術の進化 —未来へのステップ—

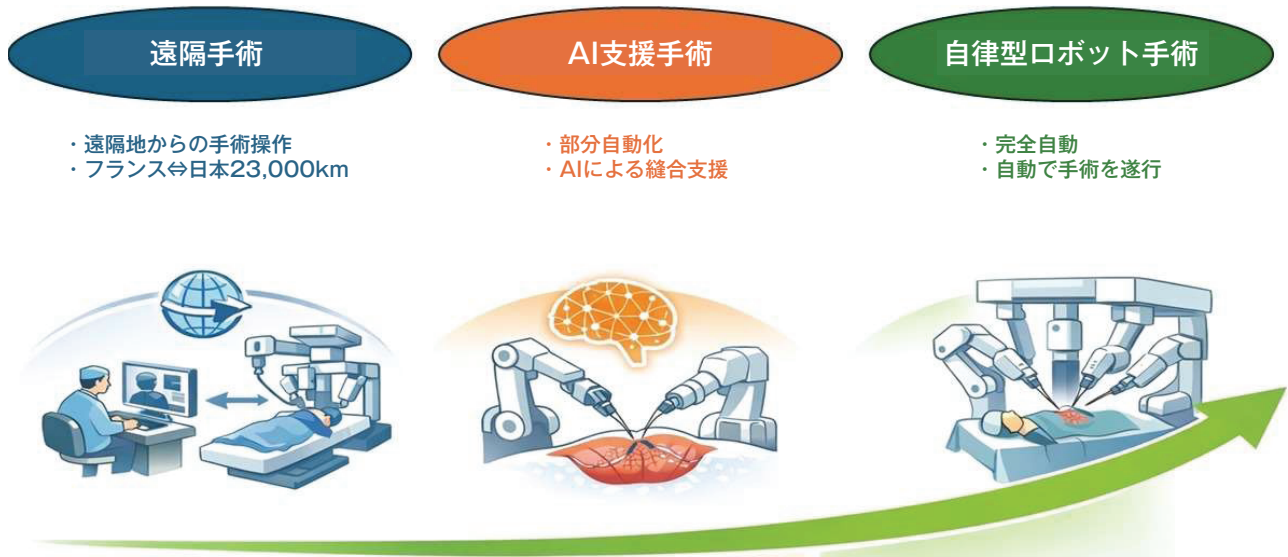


図 泌尿器科ロボット手術の進化

医不足が深刻な地方医療や離島医療において、その意義は極めて大きい。また災害医療においては、現地医療資源が不足する状況下でも高度医療を提供する手段として期待される。さらに、宇宙開発の進展に伴い、将来的には宇宙空間における遠隔手術という新たな応用領域も想定される。このように遠隔手術は単なる技術革新にとどまらず、医療提供の概念そのものを変革するポテンシャルを有する。

この文脈において、日本発の手術支援ロボットである hinotori™ は重要な位置を占める。hinotori™ は 8 軸のロボットアームを備え、高い可動性と柔軟なポート配置を可能とする設計を特徴とする。加えて、システムモジュール化により、施設ごとのニーズに応じた柔軟な構成が可能である点も利点である。また、遠隔操作および AI 統合を視野に入れた設計思想が取り入れられており、将来的な技術拡張に対応可能なプラットフォームである。国内では hinotori™ を用いた遠隔操作の実証研究が進行しており<sup>4)</sup>、臨床

応用に向けた重要なステップが踏み出されている。国産ロボットの開発は、医療機器の自立性確保という観点のみならず、日本独自の医療環境や術式に最適化されたロボット外科の確立に寄与する点で意義深い。

## II. 人工知能(AI)による自律化

一方、ロボット手術の本質的進化として最も注目されるのが人工知能を用いた外科医の手を介さない手術である。近年、ディープラーニングおよびコンピュータビジョンの進展により、手術操作の認識・解析・再現が可能となりつつある。その代表的研究として、米国の研究グループが開発した Smart Tissue Autonomous Robot (STAR) が挙げられる。同システムはブタを用いた腸吻合モデルにおいて、人の直接的介入なしに吻合操作を完遂し、その精度は熟練外科医に匹敵する結果を示した<sup>5)</sup>。この成果は、これまで熟練外科医の経験や暗黙知に依存していた手術手技が、データとして定量化され再現可能であることを示し

た点で画期的である。

さらに近年では、手術動画解析を用いた AI による術野認識や手技評価、さらには術中の危険部位のリアルタイム警告といった応用も報告されている。これにより、AI は単なる自動化ツールにとどまらず、術者の意思決定を支援する「認知支援システム」としての役割を担う可能性がある。将来的には、術中における最適な切離ラインの提示や出血リスクの予測など、より高度な支援が実現することが期待される。

しかしながら、完全自律型手術の臨床応用には依然として多くの課題が存在する。手術は本質的に非定型的であり、出血や視野不良、組織変形、予期せぬ解剖学的変異など、リアルタイムでの高度な判断を要する状況が頻発する。このため、現時点で実現されているのは縫合や組織把持などの比較的単純な手技の部分的自動化にとどまる<sup>6,7)</sup>。今後は手術工程を細分化し、それぞれのステップに対して AI 支援を導入する「段階的自律化」が現実的な進化の方向と考えられる。この過程において術式の標準化および手技の定量化が進むことは、外科医間の技量差の縮小と医療安全の向上に寄与する可能性がある。

### Ⅲ. データ駆動型外科

加えて、ビッグデータの活用はロボット手術の進化をさらに加速させる要因となる。手術動画、術中操作データ、患者背景情報などを統合的に解析することで、最適な手術戦略がデータに基づいて提示される時代が到来しつつある。このような「データ駆動型外科」は、従来の経験依存型外科からの大きな転換を意味し、個別化医療との融合により患者ごとに最適化された手術の実現を可能とする。

### Ⅳ. 展望と課題

これらの技術革新は、外科医の役割そのものに根本的な変化をもたらす。従来、外科医は自らの手技により手術を遂行する「オペレーター」であったが、今後は手術全体を設計・統括する「ストラテジスト」へと役割が移行する可能性がある。

ロボットおよび AI が操作の多くを担い、外科医は意思決定、リスク管理、異常時対応に注力する構造である。このような変化は外科教育にも大きな影響を及ぼし、従来の徒弟制度的技能習得に加え、データサイエンス、工学、情報科学を含む新たな教育体系の構築が求められる。

一方で、遠隔手術および自律化手術の実装には倫理的・法的課題の解決が不可欠である。遠隔手術においては通信障害時の安全確保や責任の所在の明確化が重要であり、国境を越えた医療提供に関する法制度の整備も求められる<sup>8)</sup>。また AI 手術においては、アルゴリズムの透明性や説明可能性、医療事故発生時の責任分担、さらには患者同意の在り方など、多岐にわたる課題が存在する<sup>9,10)</sup>。これらの課題に対する社会的合意の形成は、技術の普及に不可欠である。

### おわりに

以上のように、ロボット支援手術は現在、新たな進化の局面にある。遠隔手術は医療の地理的制約を克服し、自律化手術およびデータ駆動型外科は外科の概念そのものを変革する可能性を有する。泌尿器科はこれらの技術革新を最も早期に取り入れてきた分野であり、今後もその発展を牽引する中心的役割を担うことが期待される。ロボット手術の進歩は単なる技術革新にとどまらず、「外科医とは何か」という根源的問いを再定義するものである。人と機械が協働する外科医療の新たな時代は、すでに現実のものとなりつつある。

### 利益相反

本論文に関して、筆者に開示すべき利益相反はない。

### 文献

- 1) Nahas WC, et al : Perioperative, oncological, and functional outcomes between robot-assisted laparoscopic prostatectomy and open radical retropubic prostatectomy : a randomized clinical trial. J Urol. 2024 Jul ; 212(1) : 32-40.
- 2) Cacciamani GE, et al : Impact of surgical factors on robotic partial nephrectomy outcomes : comprehensive systematic review and meta-analysis.

- J Urol 2018 ;200(2) : 258-274.
- 3) Marescaux J, et al : Transcontinental robot-assisted remote telesurgery : feasibility and potential applications. *Ann Surg* 2002 ; 235(4) : 487-92.
  - 4) Hara T, et al : Toward safe clinical deployment of remote robotic surgery in Japan : five-year validation of the hinotori™ system using 5G wireless communication. *Int J Clin Oncol* 2025 ; 30(12) : 2389-2398.
  - 5) Shademan A, et al : Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. *Sci Transl Med* 2016 ; 8(337) : 337ra64.
  - 6) Vasey B, et al : Intraoperative applications of artificial intelligence in robotic surgery : a scoping review of current development stages and levels of autonomy. *Ann Surg* 2023 ; 278(6) : 896-903.
  - 7) Lee A, et al : Levels of autonomy in FDA-cleared surgical robots : a systematic review. *NPJ Digit Med* 2024 ;7(1) : 103.
  - 8) Dickens BM, et al : Legal and ethical issues in telemedicine and robotics. *Int J Gynaecol Obstet* 2006 ; 94(1) : 73-8.
  - 9) Cobianchi L, et al : Artificial intelligence and surgery : ethical dilemmas and open issues. *J Am Coll Surg* 2022 ; 235(2) : 268-275.
  - 10) De Micco F, et al : Robotics and AI into healthcare from the perspective of European regulation : who is responsible for medical malpractice? *Front Med (Lausanne)*. 2024 ; 11 : 1428504.