

総説

消化器外科領域におけるロボット手術の現状と展望

湯目玄

国立病院機構仙台医療センター 外科

抄録

近年、外科手術における技術革新はめざましく、その代表としてロボット支援手術（robot-assisted surgery, RAS）が急速に普及している。特に消化器外科領域では、食道癌・胃癌・大腸癌・肝胆膵疾患など幅広い疾患に対して導入が進み、今や多くの病院で実施される先端的な治療法となっている。RAS の最大の特徴は、三次元拡大視野による精緻な解剖認識、多関節鉗子による自由度の高い操作、さらに手ぶれ補正やモーションスケールによる安定した微細手技である。これらは高難度領域における郭清や再建操作を精密に安定して行うことを可能にする。また、手術操作や映像がデジタル化され記録されることにより、遠隔手術や AI を活用した手術支援といった新たな応用が現実味を帯びてきた。臨床成績としては短期的な安全性や低侵襲性の利点が報告されつつあり、長期的予後改善への可能性も期待されている。しかし、依然として高コストやエビデンスの蓄積不足といった課題が残されており、臨床研究の充実と医療経済性の検証が必要と考えられる。総じて、RAS は消化器外科における革新的技術であると同時に、デジタル技術を基盤とした外科医療の新たな発展を牽引する可能性を有しており、今後の標準治療としての確立が期待される。

キーワード：消化器外科領域、ロボット手術

（2025 年 9 月 25 日受稿、2025 年 9 月 25 日受理、連絡先：湯目玄・仙台医療センター 外科）

はじめに

近年、外科手術における技術革新はめざましく、その代表としてロボット支援手術（robot-assisted surgery, RAS）が急速に普及している。特に消化器外科領域では、食道癌・胃癌・大腸癌・肝胆膵疾患など幅広い疾患に対して導入が進み、今や多くの病院で実施される先端的な治療法となっている。RAS の主な特徴は、①高精細 3D スコープによる拡大視・立体視と深度認識、②多関節鉗子による高い操作自由度、③手ぶれ補正やモーションスケールに代表される安定した微細操作である。さらに、操作ログや映像がデジタル化され記録される点は従来手術にない利点であり、遠隔手術や AI 解析、術者教育・品質管理への応用を拓く基盤となる。

本稿では、日本で先行導入された da Vinci

Surgical System の構成と技術的利点を概説し、消化器外科で利用可能な各プラットフォームの特徴を整理する。ついで臓器別エビデンスを概観し、デジタル化がもたらす新展開と今後の課題について論じる。

手術支援ロボット da Vinci の構成

da Vinci Surgical System は、米国 Intuitive Surgical 社が開発した手術支援ロボットであり、世界で最も普及しているプラットフォームである。1999 年に米国で初めて承認され、日本では 2009 年に前立腺癌手術で導入された。2018 年には消化器外科領域を含む多数の術式で保険収載され、現在は全国の多くの基幹病院で使用されている。

現在の手術支援ロボットは、「自動で手術を行う



図 1. *da Vinci system*

<https://blue-images-isi.imgix.net/ja-jp/-/media/ISI/Intuitive/Card/Davinci-Systems/davinci-xi-surgical-system-small.png?q=75&w=255&h=461&auto=compress%2Cformat&fit=crop&crop=entropy&s=0bac0213ac08b91858bc8dd869421425>

<https://blue-images-isi.imgix.net/ja-jp/-/media/ISI/Intuitive/Card/Davinci-Systems/davinci-surgical-system-vision-cart-small.png?q=75&w=255&h=461&auto=compress%2Cformat&fit=crop&crop=entropy&s=90e58c155f347d0d2967bb69a8ce24ad>

<https://blue-images-isi.imgix.net/ja-jp/-/media/ISI/Intuitive/Card/Davinci-Systems/davinci-system-surgeon-console-front-view-small.png?q=75&w=255&h=461&auto=compress%2Cformat&fit=crop&crop=entropy&s=4fd6453a48b3ed897817087643dc562a>

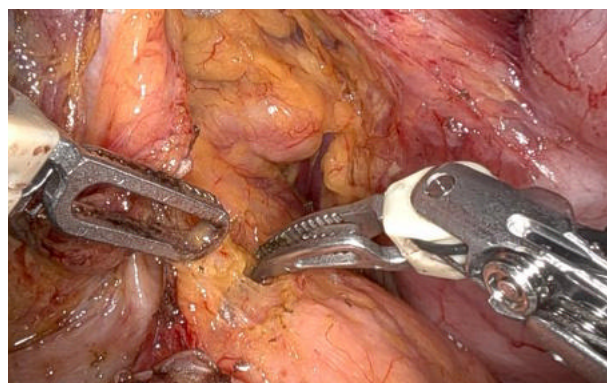


図2. *da Vinci system* の多関節機能を利用した膈上縁郭清

ロボット」ではなく、術者の操作をロボットアームが精密に再現するマスタースレーブ方式の支援システムである。システムは以下の 3 要素で構成される (図 1)。

1. サージョンコンソール (Surgeon Console)

術者が座位で操作する装置であり、いわばシステムの「頭脳」に相当する。

- ・三次元高解像度モニター：おおむね 10 倍の拡大立体視野で深度認識が可能。解剖構造の識別精度を高める。
- ・マスターコントローラ (手操作部)：手指の動きをロボットアームに伝達。手ぶれ補正、モーションスケール (大きな手の動きを縮小して精密化)が可能。
- ・フットペダル：エネルギーデバイスの切替、カメラ操作、クラッチ (アームの位置リセット) を制御。

2. ペイシェントカート (Patient Cart)

患者に接続されるロボットアーム搭載ユニットで、システムの「手」に相当する。

- ・ロボットアーム：通常 4 本 (カメラ 1 + 鉗子 3)。EndoWrist (エンドウリスト) 鉗子を使用し 7 つの自由度を実現する。手首を超えた可動域を持ち、剥離・縫合・結紮などの微細操作に適する (図 2)。
- ・エネルギーデバイス：電気メス、超音波凝固切開装置、ベッセルシーラーエクステンドおよび SynchroSealなどを装着可能。

3. ビジョンシステム (Vision System)

術野を可視化し、画像処理を担う。

- ・内視鏡カメラ：高解像度 3D カメラ。
- ・画像処理装置：高精細映像をリアルタイム処理し術者コンソールへ伝送。
- ・蛍光イメージング (Firefly™)：ICG 蛍光により血流評価や胆道走行の可視化が可能。

技術的利点の整理

- ・精密性：術者の動きを 7 つの自由度で精密に再現し、腹腔鏡では難渋する郭清・縫合・結紮を精密に遂行できる。
- ・立体視：高解像度 3D 視と拡大視で奥行き把握が容易となり、組織識別が明瞭。
- ・安定性：手ぶれ補正やモーションスケールで微細操作が安定して行える。
- ・エルゴノミクス：座位操作により術者の疲労を軽減できる。

これらの特徴は、高難度で長時間操作を要する消化器外科手術において有用性を発揮する。

消化器外科領域の手術支援ロボットのそれぞれの特徴

日本では da Vinci シリーズを中心にロボット支援手術が普及してきたが、近年は国産ロボットや新規参入機種 of 薬事承認も相次ぎ、プラットフォームの選択肢が拡大している。以下に主要機の特徴を概観する（表 1）。

1. da Vinci Xi（Intuitive Surgical）

世界的に最も広く使用される手術支援ロボットであり、消化器外科手術においても標準機となっている。EndoWrist、多関節アーム、高解像度 3D 視、手ぶれ補正に加え、アーム可動域と配置自由度が高

い。胃切除・直腸切除・肝胆膵手術など多彩な術式に対応し、国内外で多数の RCT や多施設共同研究により、安全性と有効性が裏付けられている。

2. da Vinci V（Intuitive Surgical）

2024 年に登場した最新システムであり、従来機種 of 利点を継承しつつ、コンソールの操作性やレスポンスが向上し、また、画像 of 色彩と解像度も向上している。そして、手術操作データ of 高度なデジタル化が進められており、AI 解析や遠隔手術への応用可能性が高い点が目される。

3. da Vinci SP（Single Port）（Intuitive Surgical）

単一ポートから 3 本の多関節鉗子と内視鏡を挿入可能とし、従来型より 1 つ関節 of 多いインストルメントそれぞれが体内で外側に広がることで、約 7cm の操作空間を作る。体外でのアーム of 干渉が起こらないという利点があるが、操作可能範囲が狭いため、大きな視野展開には助手鉗子や牽引器具などのサポートが必要である。また、360 度の視野を移動させることができるため、操作範囲が広い術式でも対応可能である。そして、単孔式であるので当然ながら整容性・低侵襲性 of 面で価値がある。一方、インストルメントはまだ十分ではなく課題も残る。直腸手術や胃手術などで応用が進んでいる。

4. Hinotori サージカルロボット（メディカロイド）

国産初 of 手術支援ロボットである Hinotori は、4

名称	da Vinci Xi/X Surgical System	hinotori Surgical Robot System	Hugo RAS System	da Vinci™ SP Surgical System	Saroa™	Senhance Digital Laparoscopy System	da Vinci V Surgical System
メーカー（国）	Intuitive Surgical（米国）	Medicaroid（日本）	Medtronic（米国）	Intuitive Surgical（米国）	RIVERFIELD（日本）	Asensus Surgical（米国）	Intuitive Surgical（米国）
消化器領域承認	2009 年	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年	2019 年	2024 年
アーム	一体型	一体型	独立型	一体型（単孔式）	一体型（3 本）	独立型	一体型
コンソール	クローズ	クローズ	オープン	クローズ	オープン	オープン	クローズ
インストルメント	8 mm	8 mm（スコープ 10 mm）	8 mm（スコープ 10 mm）	6 mm（2 関節）	8 mm（スコープ 10 mm）	3/5 mm（関節なし）	8 mm
消化器対象術式	食道、胃、結腸、直腸、肝、脾	食道、胃、結腸、直腸、肝、脾	消化管（胸部操作による食道を除く）	訪問アプローチを除く	一般消化器	腹腔鏡手術と同じ	食道、胃、結腸、直腸、肝、脾
特徴	高い総合力 デュアルコンソール	エルゴノミックデザイン ドッキングフリーシステム 遠隔手術	ダブルバイポーラ 未対応	デュアルコンソール	空気圧駆動 力覚フィードバック	力覚フィードバック	力覚フィードバック

表 1. 消化器外科領域の手術支援ロボット

本のアームなど基本構造は da Vinci Xi と似ている。異なる点としては、アームの関節が 1 つ多く 8 個あるためアーム同士の干渉が起きにくい。術者コンソールは日本人向けに設計され、術者のビューワーのポジションを好みに合わせて変更できるなど長時間手術におけるエルゴノミクスの改善が期待される。また、ソフトウェアアップデートによる拡張性が高く、今後の AI 連携や術中データ活用の基盤としても注目される。消化器外科領域では導入症例が増加傾向にあり、国産機として教育・普及に貢献する可能性が大きい。そして遠隔手術での使用も認められている。

5. Hugo RAS System (Medtronic)

独立型アームユニットを採用しており、手術室環境や症例に応じて柔軟なレイアウトが可能である。オープンコンソールで術者とスタッフがリアルタイムで視野を共有できる点も特徴的である。また、Medtronic 社はステープラーやエネルギーデバイスなど、腹腔鏡手術機器を数多く製造しており、それらが Hugo に適応されることで、今後、Hugo が迅速にアップデートされることが期待される。

6. Senhance Surgical System (Asensus Surgical)

腹腔鏡手術の延長線上にあるツールとして開発された。触覚フィードバック機能とアイ・トラッキングによるカメラ操作を備え、腹腔鏡に近い操作感が特徴である。鉗子は再使用可能であり、コスト効率に優れる点が中小規模施設にとって利点となる。術者の習熟が比較的短期間で可能である。

7. Soroa Surgical System (RIVERFIELD)

国産新規ロボットで、従来の手術支援ロボットがワイヤーを用いて駆動するのに対して、空気圧で駆動する世界初の力覚フィードバック機能を搭載している。従来のロボット支援手術では組織にかかる圧力やテンションを視覚的に把握するのみであったが、力覚フィードバックがあることで実際に触れてしる感覚が得られ、精度の高い手術につながると期待されている。軽量かつ小型であるが、アームがエンドスコープを含め 3 本であり、複雑な手術への適応力は今後検証が必要である。

小括

現在のプラットフォームは「エビデンスに裏打ちされた標準機」から「低コスト・教育向け」「国産開発機」「新技術搭載機」へと多様化している。各機種には固有の強みと課題があり、施設の規模、症例特性、教育体制、経済性に応じた最適な選択が求められる。

手術支援ロボットの臨床的な利点とエビデンス

臨床的には、RAS は従来の腹腔鏡手術と比較して、出血量の減少、術後合併症の低減、早期回復といった利点が報告されている。現時点での臓器別のエビデンスを以下に示す。

胃癌手術における RAS (2018 年保険収載)

胃癌に対する腹腔鏡下手術は、JCOG0912 試験¹⁾をはじめとする臨床試験により標準治療の一つとして確立したが、D2 郭清を伴う高度郭清は依然として難度が高い。RAS はその操作性により、膈上縁や脾門部など郭清困難部位における精度を高めるとされる。

日本における多施設 RCT では、RAS 群が腹腔鏡群に比して術後合併症 (Clavien–Dindo 分類 $\geq$ IIIa) の有意な減少を示し²⁾、さらに Suda らによる三年追跡データでは、RAS 群の全生存期間が腹腔鏡群より良好である可能性が示されている³⁾。このことは、RAS が単なる「低侵襲性」にとどまらず、「腫瘍学的予後改善」につながる可能性を初めて明示した点で重要である。ロボット支援胃癌手術は日本では 2022 年の診療報酬改定において消化器系のロボット支援手術で唯一加算が認められている。

食道癌における RAS (2018 年保険収載)

ランダム化比較試験は限られるが、短期成績では肺炎の発生率が低下する一方、反回神経麻痺や縫合不全には今のところ有意差がないと報告されている⁴⁾。長期成績に関しては同等という報告が多い。食道癌ガイドラインでは胸部食道癌に対しロボット支援下食道切除術を行うことを弱く推奨する、という記載となっている。

大腸癌（結腸癌・直腸癌）における RAS（直腸 2018 年、結腸 2023 年保険収載）

直腸癌は骨盤深部という狭小領域での操作を必要とし、腹腔鏡手術では鉗子干渉や自由度制限が大きな課題であった。ROLARR 試験⁵⁾では、RAS は腹腔鏡手術に比して開腹移行率を有意に低下させたが、合併症発生率や R0 切除率には統計的有意差は認められなかった。しかしサブグループ解析では、男性・肥満症例における有用性が示唆されている。また、NCD（National Clinical Database）の解析結果では、低位前方切除術での開腹移行率の低下、術中出血量減少、術後在院日数短縮、在院死亡率低下などが示されている⁶⁾。また、日本を含むアジアの多施設研究では、神経温存率向上や術後排尿・性機能の保持においてロボットの利点が報告されている⁷⁾。直腸癌における RAS の真価は、長期予後や機能温存の質に反映されると考えられ、今後の RCT による検証が期待される。結腸癌に関しても短期成績で利点が報告⁸⁾されており、長期予後の検証が今後の課題である。

膵切除における RAS（2020 年保険収載）

膵頭十二指腸切除術（PD）は再建操作の複雑さから腹腔鏡下での普及が限定的であった。ロボット支援手術はその弱点を補完し、膵空腸吻合や胆管空腸吻合といった精緻な縫合操作において有利とされる。EUROPA 試験（欧州 RCT）では、合併症率に差を認めない一方、吻合部関連合併症の低減や手術精度の向上が示唆された⁹⁾。メタアナリシスでは、輸血率低下と術後在院日数の短縮を認めているが、術後短期死亡率、R0 切除率、術後合併症、術後膵液瘻、に有意差を認めないと報告されている¹⁰⁾。長期成績に関しては腹腔鏡下手術と同等の報告が多い。ただし、手術時間の延長と高コストは依然として課題であり、これを克服するためには教育体制整備とデバイス改良が求められる。膵体尾部切除術（DP）においても同様の傾向が報告¹¹⁾されている。

肝切除における RAS（2022 年より保険収載）

日本では、肝切除における RAS は導入期にあり、保険適用・プロクター基準・NCD などの制度整備

により安全な導入基盤ができつつあり限られた施設でのみ施行されている。今後は、適応と施設基準を守り、前向きデータを積み上げて長期予後や肝機能保持に関するデータ蓄積が求められる。

RAS がもたらす新たな価値：データ化・遠隔手術・AI 活用

最大の革新は「手術のデジタル化」である。術者の鉗子操作、視線移動、デバイス使用タイミングなどがデータ化され、以下の展開が可能となる。

1. 遠隔手術（Telesurgery）

高速大容量通信記述の進歩により高速通信（5G/6G）を利用し、遠隔地からロボットを操作する試みが進んでいる。2022 年には国内でも商用通信ネットワークを用いた臨床試験が行われ、遠隔手術の実現可能性が示された¹²⁾。日本外科学会が公開した遠隔手術ガイドライン第 1 版の中では、遠隔手術の最も中心となる遠隔手術支援について述べられており、遠隔地の指導医が現地医師チームの手術を遠隔操作で直接支援することはオンライン診療指針の適応範囲で実施可能になっている。不測の事態で遠隔手術が中断されても現地術者と現地手術スタッフによって手術を続行することが可能な状態では実施可能とされていることになる（図 3）。一方、完全遠隔手術（Full telesurgery）は現地施設に手術を担当できる医師ない状況で、遠隔施設から遠隔術者が手術操作の全てを行うことを想定しており、

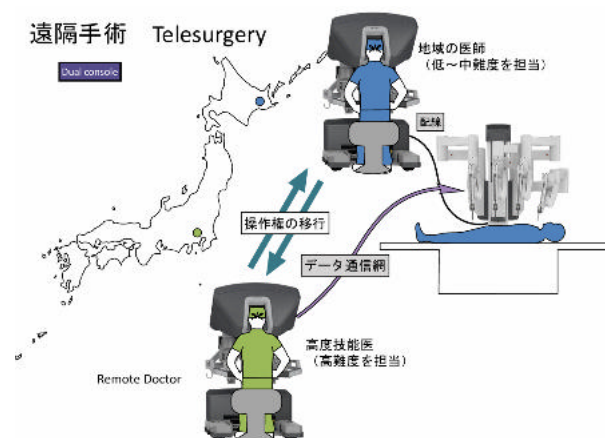


図 3. 遠隔手術のイメージ
出所 袴田健一、日本外科学会、弘前大学大学院消化器外科科学、「参考資料 4 オンライン手術（遠隔手術）について」
<https://www.mhlw.go.jp/content/10803000/000495289.pdf>

遠隔手術が中断されることができない状態で、実施に際しては 極めて高い確実性および安全性が担保されなくてはならない。そのため、法的な問題や技術面、倫理面などでも多くの課題があることから、現時点では完全遠隔手術の実施は不可としている。

2.AI による術中支援・教育

AI の一領域として位置づけられる深層学習は、多層のネットワークを中心として、高次元かつ複雑な特徴を自動的に抽出する能力で、画像認識、音声認識、自然言語処理などの分野で成果をあげている。手術支援の分野では、ロボット手術により手術データがデジタル化されたことから、手術画像収集が行いやすくなり、深層学習により、画像認識に特化した AI 技術が進歩した。EUREKA α は膨大な手術動画の深層学習を行い、手術中にリアルタイムで組織の違いを認識し、色を付けて表示したり、切るべき疎性結合組織を色で表示したりすることを可能とした。将来的には術野内での解剖構造のリアルタイム認識や自動警告システムが実現し、術者を支援がすることが可能となると考えられる。また、出血リスク予測、術者技能の客観的動作評価が可能となることで、外科教育や技能認定に新たな客観的指標をもたらすと期待される。

3. ビッグデータ解析

全国規模で RAS の操作データを蓄積することで、症例特性や手技パターンと予後の関連を明らかにできるように、個別化外科治療に資する。既存の NCD に手術操作情報を統合することで、より詳細な外科治療の質評価を可能とし、個別化医療の推進に寄与すると考えられる。

課題と展望

RAS の課題は多岐にわたる。第一に、医療経済性である。ロボット本体と年間保守費用は高額であり、費用対効果の検証が不可欠である。第二に、長期予後に関するエビデンス不足である。短期的有用性は示されつつあるが、真の臨床的価値を裏付けるには長期成績の蓄積が必要である。第三にデジタルデータ活用の側面では、患者プライバシー保護、データ共有の枠組み、といった倫理的・法的課題が重要である。これらを克服するためには、多施設共

同での臨床研究と同時に、社会制度の整備が不可欠である。

結論

消化器外科領域におけるロボット支援手術は、腹腔鏡の限界を超える精密な郭清・再建を可能にし、胃癌においては短期・長期成績改善のエビデンスが示されつつある。直腸癌、肝切除、脾切除においても有用性が報告されており、今後さらなる検証が必要である。

さらに、RAS は「手術のデジタル化」という新たな価値を提供する。遠隔手術、AI 支援、術者教育・予後予測への応用は、外科医療をデータ駆動型へと進化させる可能性を秘めている。今後、臨床エビデンスの蓄積とともに、医療経済性・教育体制・倫理枠組みを整備することで、RAS は消化器外科における未来の標準的アプローチとして確立していくと考えられる。

本論文の発表に関して開示すべき COI はありません。

参考文献

1. Hitoshi K, Junki M, Hiroshi K, et. al. Survival outcomes after laparoscopy-assisted distal gastrectomy versus open distal gastrectomy with nodal dissection for clinical stage IA or IB gastric cancer (JCOG0912): a multicentre, non-inferiority, phase 3 randomised controlled trial. *Lancet Gastroenterol Hepatol*. 2020;5(2):142-151
2. Uyama I, Suda K, Nakauchi M, et. al. Clinical advantages of robotic gastrectomy for clinical stage I/II gastric cancer : A multi institutional prospective single-arm study. *Gastric Cancer* 2019;22(2):377-385
3. Suda K, Sakai M, Obama K, et. al. Three-year outcomes of robotic gastrectomy versus laparoscopic gastrectomy for treatment of clinical stage I/II gastric cancer : a multi-institutional retrospective

- comparative study. *Surg Endosc.* 2022.
4. van der Sluis PC, et. al. Robot-assisted minimally invasive thoracoscopic esophagectomy versus open transthoracic esophagectomy for resectable esophageal cancer: a randomized controlled trial. *Ann Surg.* 2019; 269: 621-630
5. Jayne D, Pigazzi A, Marshall H, et. al. Effect of Robotic-Assisted vs Conventional Laparoscopic Surgery on Risk of Conversion to Open Laparotomy Among Patients Undergoing Resection for Rectal Cancer: The ROLARR Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2017; 318: 1569-1580
6. Matsuyama T, Endo H, Yamamoto H, et. al. Outcomes of robot-assisted versus conventional laparoscopic low anterior resection in patients with rectal cancer: propensity-matched analysis of the National Clinical Database in Japan. *BJS Open* 2021; 5: zrab083.
7. Jayne D, Pigazzi A, Marshall H, et. al. Effect of Robotic-Assisted vs Conventional Laparoscopic Surgery on Risk of Conversion to Open Laparotomy Among Patients Undergoing Resection for Rectal Cancer: The ROLARR Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2017; 318: 1569-1580
8. Schootman M, Hendren S, Loux T, et al. Differences in Effectiveness and Use of Robotic Surgery in Patients Undergoing Minimally Invasive Colectomy. *J Gastrointest Surg* 2017; 21: 1296-1303
9. Rosa K, Andre L, Yakup K, et. al. Robotic versus open partial pancreateoduodenectomy (EUROPA): a randomised controlled stage 2b trial. *The Lancet Regional Health* 2024;39:
10. Kamarajah SK, Bundred J, Marc OS, et. al. Robotic versus conventional laparoscopic pancreaticoduodenectomy a systematic review and meta-analysis. *Eur J Surg Oncol.* 2020; 46: 6-14
11. Kamarajah SK, Sutandi N, Robinson SR, et. al. Robotic versus conventional laparoscopic distal pancreatic resection: a systematic review and meta-analysis. *HPB.* 2019; 21: 1107-1118
12. Morohashi H, Kawashima K, Akasaka H, et. all. Social Implementation of Remote Surgery in Japan: A Field Experiment using a Newly Developed Surgical robot via Commercial Network. *Surgery Today.* 2021