

—特集「千葉北総病院におけるロボット支援手術の過去・現在・未来 (5)」—



ロボット肝切除における肝離断面マネジメントの工夫

青木 悠人¹ 南村 圭亮¹ 賀 亮¹ 川島 万平¹
大城 幸雄¹ 川野 陽一² 中村 慶春¹ 吉田 寛²

¹ 日本医科大学千葉北総病院外科・消化器外科

² 日本医科大学付属病院消化器外科

キーワード：ロボット支援下肝切除，ロボット支援下
肝部分切除，肝離断面

性について述べるとともに，ロボット手術における肝
離断の新たな可能性を示したい。

はじめに

肝切除術は，肝細胞癌や転移性肝癌に対する重要な根治的治療法として広く行われている．2022年度診療報酬改定において，ロボット支援手術による肝切除術が保険収載されたことで，日本国内でのロボット手術の導入が進み，肝切除術においてもロボット技術の応用が急速に拡大している¹．当院では，Da Vinci XiおよびXを用い，肝部分切除術にロボット支援手術を導入している．

しかしながら，ロボット支援手術には独特の課題があり，その一つが「術野の展開」である．ロボット手術では，鉗子先端の空間内での座標が固定されるため安定した術野を保つことができる．初めてロボット手術の助手を経験した際，自分の持つ鉗子が動いていないつもりでも，呼吸性変動により大きく動いていることに驚いた一方で，ロボットの鉗子が微動だにしないことに感動したのを覚えている．しかし，ロボットの鉗子は固定されてしまっているがゆえに力が緩衝されず，過度な牽引力が肝臓の繊細な組織に損傷を与えるリスクがある．また，Da Vinci鉗子の把持力は，基本的にコントローラーを「完全に握る」か「その手前のクリックまでで留める」かの二段階しか選択できず，従来の腹腔鏡手術や開腹手術のように「適切な力加減で」把持することはできない．よってロボット支援手術では，従来の手術で意識せずに自然に行っていた，力の緩衝や加減といった肝組織（特に肝被膜）の損傷予防効果が再現しにくい．

これらの課題を克服するため，筆者らはシリコン製の外科用テープ（血管テープ）を使用した新しい術野展開法を導入した．この方法は，肝臓にテープを縫合固定し，牽引時に呼吸性変動や力の分散を効果的に利用することで，肝被膜への損傷を軽減することを目的としている．本稿では，この術野展開法の詳細と有用

腹腔鏡下手術とロボット手術の鉗子の比較

改めて書き記す必要はないかもしれないが，ロボット手術支援機器のアームや鉗子は，モーターでコントロールされており，そこにかかる力が術者の手元（マスターコントローラー）に伝わることはない．もちろんそのフィードバックがないことを踏まえても，あまりあるほどの美麗・微細な視覚情報により，術者は繊細に力加減をコントロールすることができる．全く微動だにしない固定された視野の中で安定した手技が行えることは，開腹や腹腔鏡手術ではなし得ない，ロボット手術の最大の魅力とも言える．しかしながら，突発的に不意にかかった力に関し，それを緩衝するように瞬時にコントロールをすることはできない．まして，リトラクションに用いているなどで，コントロールがアクティブになっていないアームは，空間内での座標を維持し固定されているため，そこにかかる力が変化しても動くことはない．

一方で，外科医が直接保持・操作している腹腔鏡手術の鉗子は，外力によりどうしても動いてしまう．動かないように保持しているという動作は，同じ力加減で保持していることであり，位置を固定しているわけではない．よって，呼吸性変動によっても鉗子はブレるし，不意に助手の鉗子が動くなどでカウンタートラクションが強くなれば，その分術者の鉗子も力を緩衝する方向に自然と僅かに移動している．

また，厚手の組織を把持するような場合，開腹手術よりは感覚が乏しいものの，腹腔鏡の鉗子も組織を把持した瞬間にグリップに力が伝わりはじめ，熟練した術者であれば，組織を損傷せず，滑りもしない適度な把持力で組織を掴むことができる．一方でロボット手術では，マスターコントローラーに把持した力は伝わらないため，極めて高い技術を持つ熟達者であれば視覚情報だけで完璧に力，つまりマスターコントロー



図1 肝離断面展開方向の模式図

A：離断面を離断面に対しそれぞれ90度に近い方向に牽引し、180度に近いトラクションとすると、離断面を横切る脈管が肝実質に沿って寝てしまい視認しづらくなる。また過度な力がかかり、股裂損傷や引き抜き損傷のリスクとなる。

B：適切な展開。離断面をそれぞれ45度程度尾側に牽引すると、離断面を横切る脈管が肝実質から距離が生まれることで視認し易くなり、また過度な力による股裂損傷や引き抜き損傷を防ぐことができる。

ラーの握り込み具合をコントロールできるのかもしれないが、基本的にはマスターコントローラーをクリックの手前まで握るか、完全に握り込むかの2パターンの力加減でのみ、組織を把持することとなる。

従来、筆者らは腹腔鏡下手術において、鉗子で肝臓・離断面を押すだけでなく、肝臓に牽引糸をかけてそれを鉗子で牽引する方法や、肝臓自体を直接鉗子で把持するような操作も用いて離断面を展開していた。ロボット支援下肝切除の導入当初は、なるべく腹腔鏡下手術で培った手技を模倣したいという想いもあり、同様の方法を用い離断面の展開を試みた。むしろブレのないロボットの特性により、腹腔鏡下手術以上に安定した術野が得られるものと期待していた。しかし、腹腔鏡手術と同じように操作を行っているつもりでも、牽引糸をかけた部分の肝被膜が破れ牽引糸が外れてしまったり、直接把持した部分の肝被膜が破れたり肝実質が潰れたりすることで、うまく展開ができなかった。おそらくこれは前述したようなロボット手術の特性によるものと考えられる。

また、理想的に肝離断面を展開するためには、手前に引き出すような力が必要であるが、把持や牽引糸を使わない展開を行うと離断面の片側を押し込むような展開になりがちで、離断中に現れる脈管の視認性が悪くなり、また股裂損傷や引き抜き損傷による出血や胆汁漏のリスクが増加する(図1)。

そこで、ロボット支援下手術においては、緩衝作用のある方法を用いて術野を展開する必要があると考え、展開方法を再検討した。

当科における手術手技の工夫

現在行っているロボット支援下肝切除術の概要を示す。体位は仰臥位～左側臥位のうち、肝離断面をIVC

から最も高くできる位置とする。腫瘍の位置に合わせてポートを挿入し、ロールイン、腫瘍にターゲッティングを行ったのちに、Pringle maneuverに備え、肝十二指腸間膜をネラトンチューブで確保し、これを体内式タニケットとしている。

術中超音波を用い、腫瘍の診断・切離ラインの決定・マーキングを行ったのち、離断面を展開するため、温存肝側・切除肝側にそれぞれ、リング状に結んだシリコン製外科用テープ(シリコンリング)を4点Z縫合で縫着する。1点のみの縫着に比べ、牽引力が分散されるため肝被膜の損傷リスクが軽減され则认为っており、なるべく縫合する4点が等間隔となるように気を付ける。必要に応じて、数カ所施行し、離断中の展開に合わせて追加してもよい。このシリコンリングに#1-0絹糸を通し、筋膜クローサーで適切な方向の体外へ誘導し、牽引に用いる(図2)。

離断時の適切なトラクション角度は、図1で示した通り、離断面に対して完全な90度ではない。脈管の視認性向上や、脈管の股裂損傷や引き抜き損傷を防ぐためにも、離断面に対してそれぞれ45度程度の方向へ、尾側方向にも適度に牽引のトルクをかける。その際、過度な力がかからないよう術野をよく観察しながら、patient side surgeonと協力して牽引し、ペアンで糸を噛み固定する。横隔膜方向に牽引する場合は、横隔膜に糸を刺入して固定する方法やオーガンリトラクターのフックを用いる方法がある。しかし、横隔膜を貫通すると気胸のリスクがあるため、過度な刺入は避ける必要がある。一時的であればretraction armを用いて展開しても良い。離断中にテンションが緩んできた場合は、必要に応じて牽引力を増減し、方向も細かく調整する。基本的には、ロボットのアームを使用しなくとも、離断面に適切なテンションがかかるように調整

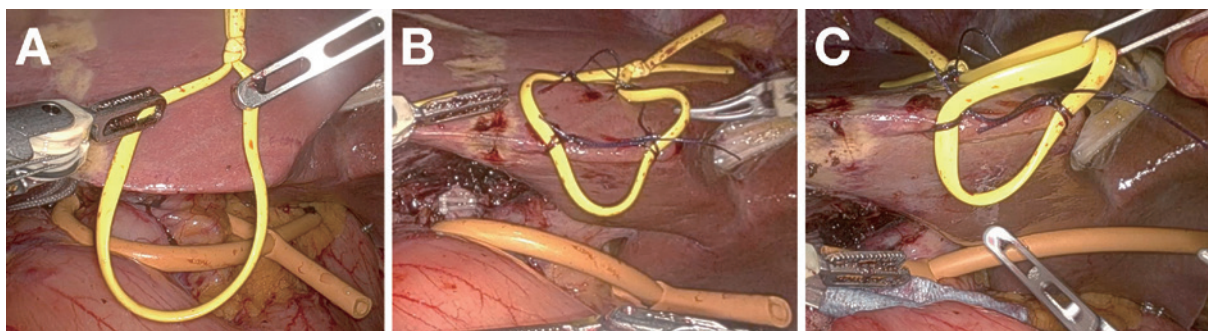


図2 シリコンリングを用いた牽引操作

- A: シリコン製外科用テープ（血管テープ）をリング上に結んで、シリコンリングとして使用する。
 B: シリコンリングを肝臓に4点Z縫合にて縫着する。
 C: 縫着したシリコンリングに#1-0 絹糸を通して、これを体外へ誘導し牽引に用いる。

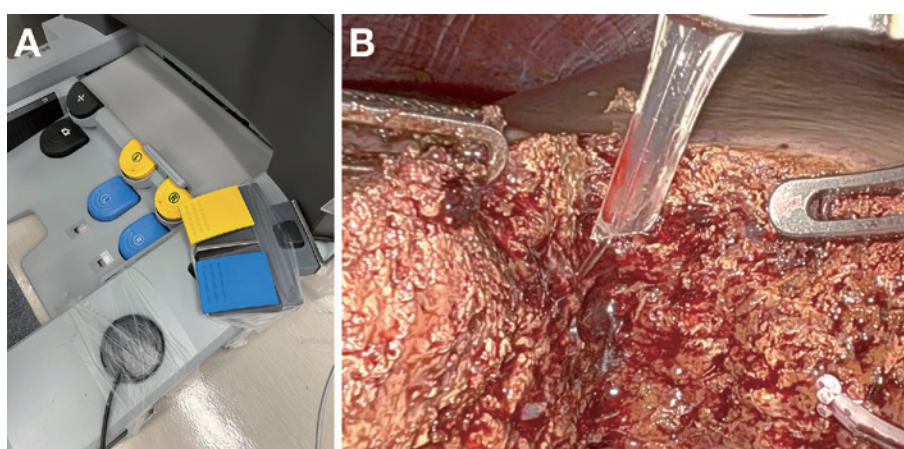


図3 ロボット肝切除術における送水・吸引の工夫

- A: 肝切除時の surgeon console の足元. ERBE VIO3 のフットスイッチと、送水機のフットスイッチを設置している。
 B: 腹腔内に挿入されたダブルルーメンチューブ. 持続吸引となっており，surgeon console の送水機のフットスイッチを踏むことで送水操作も行える。

できると、良好な術野を得られやすい。またどうしても直接肝臓を鉗子で把持し、少し大きめの力で牽引する必要が生じた場合には、鉗子の先端に直接履かせるタイプの衛生材料である、ラパクリアDカバーを装着すると適度な抵抗を得られ、滑りにくくなる。

筆者らは5 mmのアシストポートを通じてダブルルーメンの吸引チューブを挿入し、消化管内視鏡用の送水機を用いることで、console surgeonが離断面の洗浄・吸引を行えるようにしている（図3）。それでも吸引操作は腹腔鏡手術よりも難しく、出血のない離断が望ましいため、肝離断の際にはPringle maneuverを併用している。離断面のテンションはシリコンリングの牽引によって維持されるため、4th arm (retraction arm) や1st arm (左手の鉗子) は牽引方向の微調整や一時的な牽引のみに使い、肝臓自体に過度な力をかけ

ないようにする。

肝離断は、ロボット手術に適応させた細かいバイトでのclamp crushing法を用いる（図4）。デバイスはdouble bipolar法としており、肝離断にはVIO3に接続したメリーランドバイポーラーを用いている。VIO3に接続することで、バイポーラカットとソフト凝固の両方を使用可能であり、脈管の切離や繊細な剥離と、止血操作とを使い分けることができる。腹腔鏡手術ではロボット手術に比べるとより大きな3~5 mm程度のバイトでcrushを行っていたが、同じ要領で行うと出血が多い印象を受ける。これは、ロボットの特性として、脈管などの抵抗があっても先端がブレず、当初の位置のまま、設定された一定の力でcrushが行われることが関与している可能性がある。腹腔鏡手術では、脈管を認めた場合に優しく脈管ごとcrushしていた

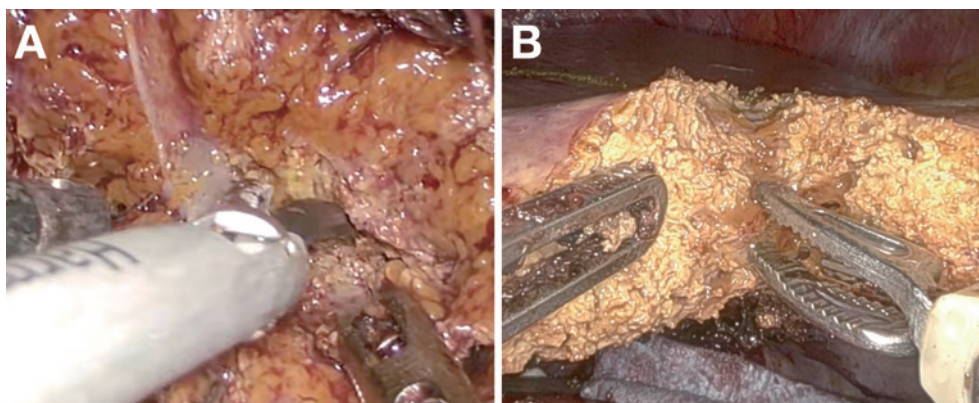


図4 腹腔鏡下手術とロボット支援下手術の clamp crushing 法の比較

A：腹腔鏡下手術ではハーモニック®の1/3程度を使用して crush していた。

B：ロボット支援下手術では Maryland bipolar 鉗子の先端のみを使用し小さいバイトでの crush を行っている。

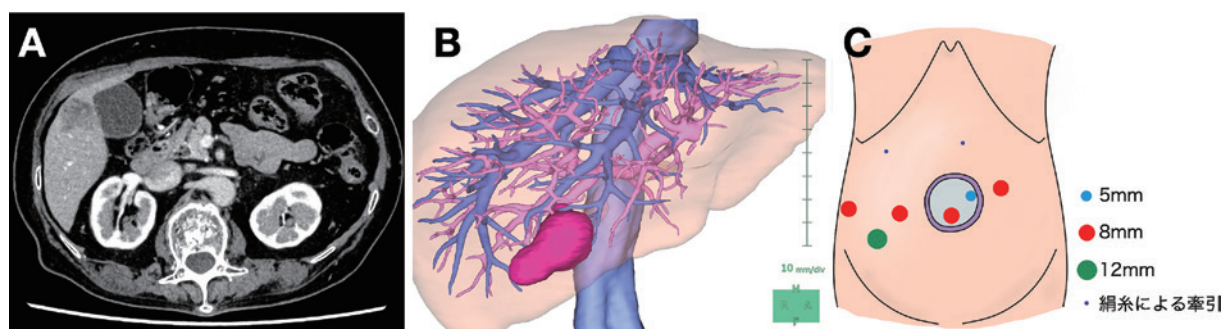


図5 症例呈示（肝 S5 部分切除術）。肝 S5, 胆嚢床に接するように大腸癌の転移を認める。

A：造影 CT

B：3D 術前シミュレーション

C：ポート配置

が、ロボット手術では脈管を直接噛むことなく、その周囲を1~2 mm程度のバイトで crushしながら脈管壁を露出させるような感覚で進める。露出した脈管を切離し、テンションが緩んだ場合には適宜牽引の力や方向を微調整する。これを繰り返して肝離断を完遂する。離断面の方向が大きく変わる場合には、シリコンリングの追加や牽引糸の方向調整を適宜行うことが重要である。

症例呈示

最近の当科の手術として、S5の肝転移の症例を提示する。胆嚢床に近く、胆嚢摘出を施行後に、肝S5の部分切除を施行した（図5）。

IOUSを確認し切除ラインをマーキングしたのちに、シリコンリングを用いて牽引の準備をした。まずは患者左側の離断から施行したため、S4の肝下縁と切除肝の肝下縁にシリコンリングを縫着し、#1-0絹糸を

通して左上腹部と右上腹部方向に牽引した。肝離断は細かいバイトでの clamp crushing 法で行っていき、適宜脈管を処理した。1st armは基本的には離断面に添え、テンションの微調整を行うが、必要に応じ適宜1st arm・4th armで肝実質やシリコンリングを把持し、牽引方向の微調整を行った。ただし、この時にあくまでも牽引の補助や方向の調整に用いるのみであり、牽引のトルク自体は体外からの絹糸での牽引で主に得られるよう注意した。ある程度頂点付近まで離断したのちに、シリコンリングをS5の温存される部分（切除肝の右側）の肝下縁にも縫着し、今度はS5の温存される部分と、切除肝をそれぞれ#1-0絹糸を用いて右上腹部と左上腹部方向に牽引した。右側の離断を進め、最後に残った頂点は4th armで切除肝のシリコンリングを腹側に展開し、尾側から離断して切除を終えた（図6）。

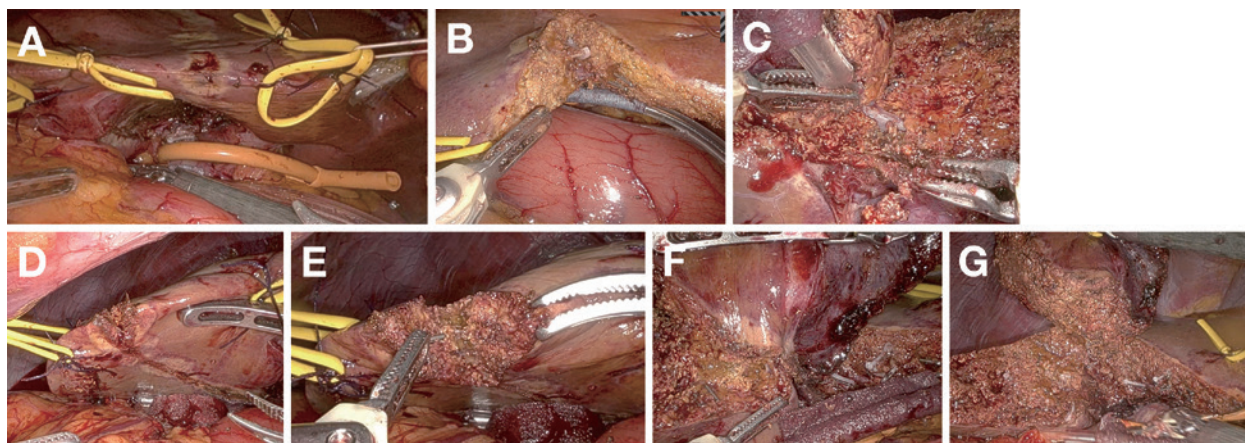


図6 呈示症例（肝 S5 部分切除術）の術中写真

- A：S4 の肝下縁と切除肝の肝下縁にシリコンリングを縫着し，#1-0 絹糸を通して左上腹部と右上腹部方向に牽引。
 B：患者左側から肝離断を開始。1st arm（左手の鉗子）や 4th arm（retraction arm）は牽引の方向を微調整することを使用し，それ自体で大きな力を加えない。
 C：左側の離断は頂点付近まで離断した。
 D：シリコンリングを S5 の温存される部分（切除肝の右側）の肝下縁にも縫着し，今度は S5 の温存される部分と，切除肝をそれぞれ #1-0 絹糸を用いて右上腹部と左上腹部方向に牽引。
 E：右側の離断を開始。
 F：最後に残った頂点部分は 4th arm で切除肝のシリコンリングを腹側に展開し，尾側から離断。
 G：肝離断を終了。

考 察

近年，本邦においてもロボット支援下肝切除は急速に普及している。2018 年の国際コンセンサスにおいて，ロボット支援下肝切除も腹腔鏡下肝切除・開腹肝切除と同様に安全に実施可能と結論づけられた²。しかし，肝離断において実績のあるデバイスがないこと，肝実質の把持や離断の際に重要な触覚が得られずまた適切な力加減が難しいこと，離断中に出血した際に送水や吸引の難度が高いことなど，他の領域のロボット支援下手術に比べると，導入の障害の多い術式である。すでにロボット支援下肝切除術に関して多くのシステムティックレビューやメタアナリシスが存在し，ほとんどは腹腔鏡下手術とロボット支援下で短期成績に差はないとされる³⁻⁶。しかし一方で，ロボット支援下手術において難度の高い手術が多く，開腹移行率が低いという報告もみられ，難度の高い手術ではロボット支援下手術が有効とする報告も認められる^{4,5,7-9}。また今後は，ロボットの精密な操作性を活かし，ドナー手術や肝門部領域胆管癌の複雑な肝切除・再建手術，血行再建を伴う肝切除など，高難度手術への応用が期待され，報告もなされている¹⁰。

実際に surgeon console に座っていて感覚を感じられないことに違和感はほとんどない。しかし実際には前述のように，触覚の欠如が無意識のうちにロボット

支援下肝切除を難しくしているのかもしれない。今後これが改善されたロボットが登場することは期待されるものの，現時点では立ち向かわなければならない課題と考えている。他領域のロボット支援下手術においては，厚みのある実質を損傷しないよう繊細に掴むという操作がほとんどなく，掴んだ後の牽引の力加減は微細な視覚情報により十分補うことができる。肝切除においても一見すると同様に思ってしまうため意識しづらいのだが，肝実質を把持する際の滑りもせず損傷もしない適切な力加減は，コントロールが困難であり，また助手の牽引などの変化や呼吸性変動など外力の入力による瞬発的な力に対する対応を困難にしている。当科では，この課題を補うため，緩衝材としてシリコンリングを用いた牽引方法を考案した。シリコン製外科用テープを使用した，類似の肝離断面の展開方法は，腹腔鏡下肝切除において Sakai らが報告しており，ナイロン糸や絹糸による stay suture での牽引では，縫合部位の肝実質を損傷するリスクがあるが，弾性のあるシリコンテープを用いることで過剰な牽引を避けることができ肝実質や肝静脈を損傷することはなかったとしている¹¹。緩衝作用のある材質が挟まることで，急激な外力による肝被膜や実質の損傷を防ぐことができ，またロボット鉗子で直に肝臓を把持する方法ではどうしても難しい，手前方向への牽引も簡単に行うこ

とができる。以前から施設によって様々であることは認識しているが、温存肝に牽引などのために縫合糸をかけることには抵抗があったが、ロボット支援下肝切除においては、必要なものと思い直した。今後、触覚のフィードバック技術の進歩により、術者が把持圧をより感覚的に制御できるロボットシステムが開発されれば、状況は次のステージへと向かうかもしれない。

ロボット支援下肝切除に関してはまだ施設により術野の展開方法・肝離断方法は様々な報告がなされ、一定の見解がないのが実情である。ロボット手術の一般的な利点と言われる、固定された術野を得るためには、通常腹腔鏡下肝切除の技術や他領域のロボット支援下手術の技術のみでは叶わず、ロボット支援下肝切除固有の課題を解決する必要がある。また、肝離断方法については、いまだ学会や研究会でも様々な議論がなされている。現在われわれが好んで行っている細かいバイトでの clamp crushing 法は、腹腔鏡下肝切除での肝離断と同等かそれ以上のクオリティを得られるものと考えている。当科で用いているシリコンリングによる牽引と、surgeon console から操作可能な送水・吸引チューブはそれを補助する有用なシステムと思われる。

まとめ

日本医科大学千葉北総病院におけるロボット支援下肝切除術の工夫について解説した。ロボット支援下肝切除術には他領域のロボット支援下手術にも腹腔鏡下肝切除術にもない特有の課題があるが、それも様々な工夫により徐々に克服しつつあり腹腔鏡下肝切除術に劣らないクオリティの手術となった。今後さらなるクオリティの高い手術を目指し、技術の発展とともに最適な手技の確立を進めていく必要がある。

Conflict of Interest : 開示すべき利益相反はなし。

文 献

1. Minamimura K, Aoki Y, Kaneya Y, et al: Current Status of Robotic Hepatobiliary and Pancreatic Surgery. *J Nippon Med Sch* 2024; 91: 10-19.
2. Liu R, Wakabayashi G, Kim HJ, et al: International consensus statement on robotic hepatectomy surgery in 2018. *World J Gastroenterol* 2019; 25: 1432-1444.
3. Montalti R, Berardi G, Patrìti A, Vivarelli M, Troisi RI: Outcomes of robotic vs laparoscopic hepatectomy: A systematic review and meta-analysis. *World J Gastroenterol* 2015; 21: 8441-8451.
4. Beard RE, Khan S, Troisi RI, et al: Long-Term and Oncologic Outcomes of Robotic Versus Laparoscopic Liver Resection for Metastatic Colorectal Cancer: A Multicenter, Propensity Score Matching Analysis. *World J Surg* 2020; 44: 887-895.
5. Zhang L, Yuan Q, Xu Y, Wang W: Comparative clinical outcomes of robot-assisted liver resection versus laparoscopic liver resection: A meta-analysis. *PloS one* 2020; 15: e0240593. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240593>
6. Murtha-Lemekhova A, Fuchs J, Hoffmann K: Innovation for the Sake of Innovation? How Does Robotic Hepatectomy Compare to Laparoscopic or Open Resection for HCC-A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cancers (Basel)* 2022; 14: 3359. <https://doi.org/10.3390/cancers14143359>
7. Ciria R, Berardi G, Alconchel F, et al: The impact of robotics in liver surgery: A worldwide systematic review and short-term outcomes meta-analysis on 2,728 cases. *J Hepatobiliary Pancreat Sci* 2022; 29: 181-197.
8. Gao F, Zhao X, Xie Q, et al: Comparison of short-term outcomes between robotic and laparoscopic liver resection: a meta-analysis of propensity score-matched studies. *Int J Surg* 2024; 110: 1126-1138.
9. Liang B, Peng Y, Yang W, et al: Robotic versus laparoscopic liver resection for posterosuperior segments: a systematic review and meta-analysis. *HPB (Oxford)* 2024; 26: 1089-1102.
10. Adachi T, Hara T, Matsushima H, Soyama A, Eguchi S: Essential updates 2022/2023: A review of current topics in robotic hepatectomy. *Ann Gastroenterol Surg* 2024; 8: 774-777.
11. Sakai H, Sato T, Nomura Y, et al: Laparoscopic Liver Resection Using a Silicone Band Retraction Method (With Video). *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech* 2021; 31: 378-384.

(受付 : 2025 年 2 月 16 日)

(受理 : 2025 年 2 月 20 日)

日本医科大学医学会雑誌は、本論文に対して、クリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 (CC BY NC ND) ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) を採用した。ライセンス採用後も、すべての論文の著作権については、日本医科大学医学会が保持するものとする。ライセンスが付与された論文については、非営利目的で、元の論文のクレジットを表示することを条件に、すべての者が、ダウンロード、二次使用、複製、再印刷、頒布を行うことができる。