

INVITED REVIEW ARTICLE

ロボット支援下肺癌手術の現状と将来展望

中村廣繁<sup>1</sup>・春木朋広<sup>1</sup>・窪内康晃<sup>1</sup>・  
松居真司<sup>1</sup>・大野貴志<sup>1</sup>

Current Status and Prospects of Robot-assisted Thoracoscopic Surgery for Lung Cancer

Hiroshige Nakamura<sup>1</sup>; Tomohiro Haruki<sup>1</sup>; Yasuaki Kubouchi<sup>1</sup>;  
Shinji Matsui<sup>1</sup>; Takashi Ohno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of General Thoracic Surgery, Department of Surgery, Faculty of Medicine, Tottori University, Japan.

**ABSTRACT** — Robot-assisted thoracoscopic surgery for lung cancer has been rapidly spreading in Japan since lobectomy and segmentectomy became covered by national insurance in 2018 and 2020, respectively. In the 2022 Lung Cancer Clinical Practice Guidelines, robotic surgery is recommended as Grade 2B and recognized as an option for minimally invasive surgery. Robotic surgery has good maneuverability, especially at the hilum, and can facilitate meticulous operations for blood vessels and bronchi and lymph node dissection of the hilum and mediastinum with high accuracy. Consequently, the more difficult the surgery, such as in cases of advanced cancer, surgery after preoperative therapy, and segmentectomy, the more attractive this approach is. Although there is no clear evidence supporting the advantages of robotic surgery for lung cancer surgery in Japan at present, with the advent of new devices and new surgical robots, further development is expected.

(JLCC. 2023;63:929-938)

**KEY WORDS** — Lung cancer, Robot-assisted thoracoscopic surgery, da Vinci, Current status and prospects, New surgical robots

Corresponding author: Hiroshige Nakamura.

**要旨** — 肺癌に対するロボット支援下手術（以下、ロボット手術）は、2018年度に肺葉切除、2020年度に区域切除が保険適応となった後から急速に普及している。近年は多数のシステムティックレビューやメタアナリシス、前向き無作為比較試験の結果も報告され、ロボット手術は胸腔鏡手術と比較して同等かそれ以上の成績が示されており、2022年度の肺癌診療ガイドラインでもロボット手術は推奨グレード2Bとなり、低侵襲手術のオプションの一つとして、選択可能な位置付けとなった。ロボット手術は特に肺門部などへの操作性が良好で、血

管・気管支の剥離操作、肺門・縦隔のリンパ節郭清を高い精度で行うことが可能であるし、進行癌や術前治療後の手術、区域切除など難易度の高い手術であるほど、その威力を発揮してくれる。本邦ではいまだ有用性を示すエビデンスは証明されていないが、新たなデバイスや新型手術支援ロボットの登場でさらなる発展に期待がかかっている。

**索引用語** — 肺癌、ロボット支援手術、ダビンチ、現状と展望、新型手術支援ロボット

はじめに

呼吸器外科におけるロボット支援下手術（以下、ロボット手術）は2000年当初より、応用が始まったが、なか

か普及に至らなかった。<sup>1</sup>しかしながら、2018年度に肺癌に対する肺葉切除と縦隔腫瘍手術、2020年度に肺癌に対する区域切除と重症筋無力症に対する胸腺摘出術の4術式が保険適応となった後から急速に拡大した。

<sup>1</sup>鳥取大学医学部 呼吸器・乳腺内分泌外科学分野。

論文責任者：中村廣繁。

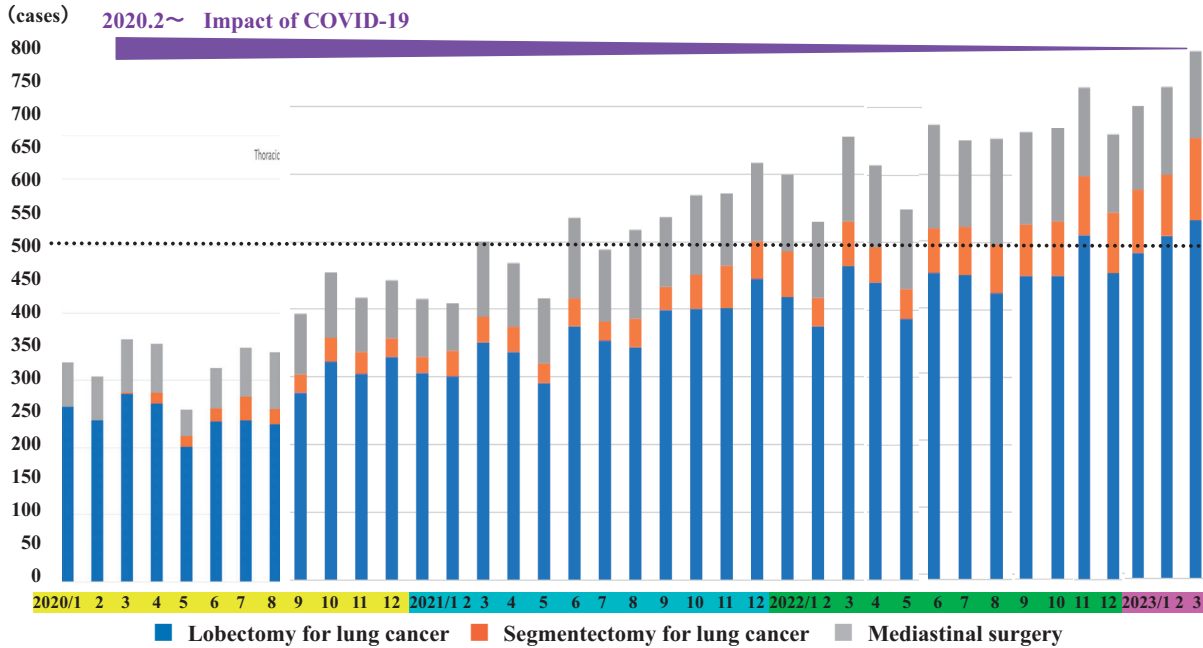


Figure 1. Changes in the number of cases of robot-assisted thoracoscopic surgery.

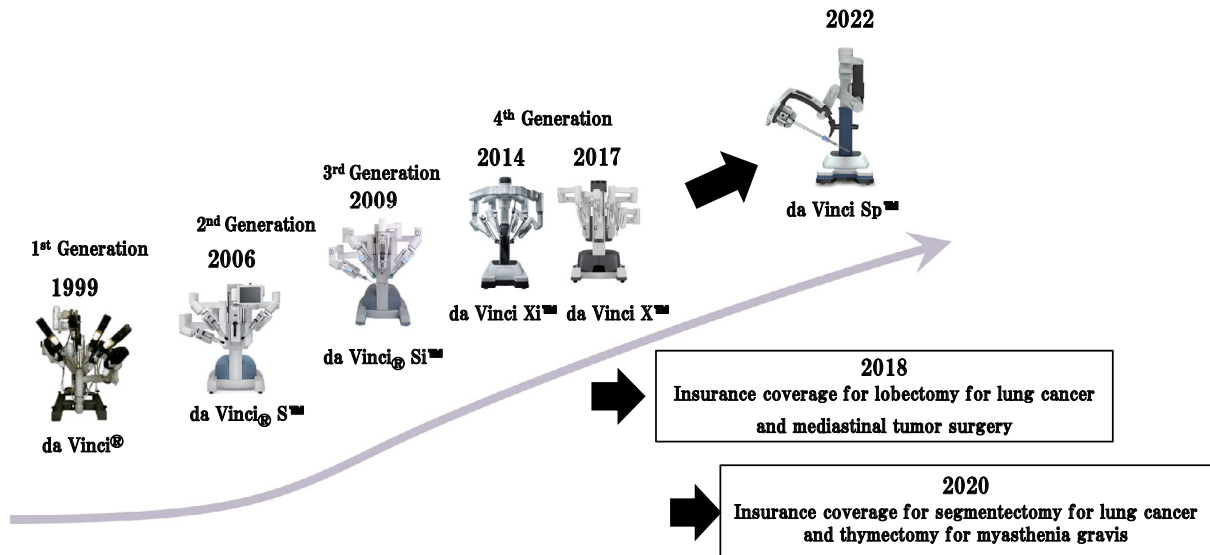


Figure 2. Evolution of the da Vinci surgical robot and insurance coverage of robotic thoracic surgery.

COVID-19 感染症の影響が懸念される中でも、2022 年には約 160 施設において年間約 6,500 例の肺癌に対する手術（肺癌手術全体の約 15%）が行われ、日常診療の一つとなるまでに発展し、本格的なロボット手術時代が到来した（Figure 1）。また、手術支援ロボットのダビンチ（Intuitive Surgical Inc.）も着実に進化し、現在は第 4 世代の X, Xi が主流となる中で（Figure 2）、2022 年 9 月にはシングルポートの Sp が薬事承認を受けた。さらに、2023 年 5 月には国産の新機種手術支援ロボットであ

る Sroa (Riverfield Inc.) も呼吸器外科領域で薬事承認され、さっそく実地臨床での使用が始まった。すでに他領域では続々と新機種の手術支援ロボットが導入されていく中で、今後呼吸器外科領域において肺癌に対するロボット手術をどのように発展させていくか、現状をもとに将来を展望する。

**Table 1.** List of RCTs on Robotic Thoracic Surgery

Identifier	NCT02617186	NCT02804893	NCT03134534	NCT03152071	ChiCTR- INR-17012777
Trial name	RAVAL Trial	ROMAN study	RVlob Trial	—	—
Start date	2016. 1	2017. 3. 6	2017. 6. 15	2017. 8. 15	2016. 1
Completion date	2021. 1	2023. 3. 6	2022. 8. 31	2018. 7. 1	2018. 12
Intervention	RATS versus VATS	RATS versus VATS	RATS versus VATS	RATS versus VATS	RATS versus open
Primary outcome	Difference in HRQOL scores, measured by the EQ-5D-5L questionnaire at week 12	Intraoperative complications and postoperative complications (90 days)	3-year overall survival and lymph node counts	Postoperative pain (2 months)	Disease free sur- vival (DFS) and overall survival (OS)
Country	Canada	Italy	China	Belgium	China
Publication	—	Front Oncol 2021 (Ref. 7)	Ann Surg 2022 (Ref. 8)	—	Transl Lung Cancer Res 2019/2021 (Ref. 9, 10)

## 肺癌に対するロボット手術の現状

### ロボット手術の特徴と開胸および胸腔鏡手術との比較

ロボット手術の最大の利点は、3次元視野下に関節を有する自由度の高い鉗子を用いて精緻な手術操作ができてことである。これまで多くの後方視的研究が行われてシステムティックレビューやメタアナリシスも多数ある中で、最近では Júnior ら<sup>2</sup>が59論文という多数の報告をまとめて、ロボット手術と胸腔鏡手術の比較で周術期成績、全生存期間 (OS)、無再発生存率 (DFS) のすべてがほぼ同等であるとした。一方で、ロボット手術にやや分があるという報告も多くあり、Aiolfi ら<sup>3</sup>は34論文を解析して、開胸手術、胸腔鏡手術とロボット手術の比較でロボット手術は、開胸手術よりも出血量、術後在院日数、術後再入院、術後30日死亡、術後合併症が少なく、胸腔鏡手術よりもリンパ節郭清個数が多いと報告した。また、Wu ら<sup>4</sup>は25論文を解析し、ロボット手術は胸腔鏡手術よりDFS、術後30日死亡において良好であると述べた。さらに、Zhang ら<sup>5</sup>も26論文を解析し、出血量、コンバージョン率、在院日数、リンパ節郭清個数、5年DFSでロボット手術が良好であったと報告している。ロボット手術の課題とされてきた手術時間についても、熟練とともに近年は著明に短縮している。<sup>6</sup> このように近年は、総じてロボット手術の優越性を示す論文が多い傾向があるが、ロボット手術のベネフィットを正確に導くにはさらなる症例の蓄積と、ロボット手術と胸腔鏡手術を比較した前向き無作為化試験 (RCT) が必要であると考察されている。

そして、依然として大きなデメリットはロボット手術の高いコストの問題であり、本邦でも呼吸器外科領域においていまだ保険上での加算が取れていないため最大の

課題として残っている。

### ロボット手術のエビデンスはどこまで解明されたか？

近年、ロボット手術のメリットを明らかにするために海外では多くの臨床試験が計画されてきた (Table 1)。特にロボット手術と胸腔鏡手術を比較したRCTが4本行われている中で、2021年にROMAN study (NCT 02804893)<sup>7</sup> と2022年にRVlob Trial (NCT03134534)<sup>8</sup> の結果が示された。その結果、ロボット手術と胸腔鏡手術の周術期成績は同等で、リンパ節郭清 (郭清個数、郭清ステーション数) ではロボット手術が良好とされている。さらには、cN2肺癌に対するロボット手術と開胸手術のRCT (ChiCTR-INR-17012777)<sup>9,10</sup> では、周術期成績の比較で出血量においてロボット手術の優位性が示され、予後は同等であると報告された。

従ってこれらの結果を受けて、ロボット手術は胸腔鏡手術と比較して少なくとも非劣性であり、肺門部などへの操作性が良好であること、リンパ節郭清の精度が高いことから今後は局所進行肺癌に対する適応の拡大も期待される。2022年度の肺癌診療ガイドライン上でもロボット手術は胸腔鏡手術と同様に推奨グレード2Bとなり、低侵襲手術のオプションの一つとして、臨床病期I期の非小細胞肺癌に対して選択可能な位置付けとなった。

### 本邦における肺癌に対するロボット手術に関する研究

本邦では、2010年に初めて肺癌に対するロボット手術が行われ、2014年には9施設から60例の肺癌に対する多施設共同研究の成績が報告された。<sup>11</sup> 初期症例であることから手術時間は長かったが、注目されたのは術後合併症の発生率が4例 (6.7%) と少なかったことであり、大きな合併症がなかったことである。一定の選択バイアスがあったとはいえ安全に導入できたことは評価できる。その後は、単一施設からの報告のみで大規模解析は

なかなか行われず、近年ようやくデータベース事業である NCD (National Clinical Database) を用いたビッグデータ解析が始まったところである。また、ロボット手術に関する臨床試験として術後疼痛に関するロボット手術と胸腔鏡手術の比較試験 (UMIN 登録番号 UMIN 000041514) が実施されており、その解析結果が待たれる。**肺癌に対するロボット手術のメリットはどこにあるのか?**

ロボット手術の良好な操作性は、実際の肺癌手術においてどのようなメリットがあるだろうか? 血管・気管支の剥離操作、肺門・縦隔のリンパ節郭清を高い精度で行うことが可能であるし、進行癌や術前治療後の手術、区域切除など難易度の高い手術であるほど、その威力を発揮してくれる。具体的に文献的考察を加えて述べてみたい。

#### リンパ節郭清

リンパ節郭清において、ロボット手術では胸腔鏡手術と比較して多くのステーションや個数を郭清でき、リンパ節郭清後のアップステージ率が高かったという報告がある。<sup>6</sup> Kneuertz ら<sup>12</sup>はロボット手術 254 例、胸腔鏡手術 296 例、開胸手術 261 例を比較して、リンパ節転移のアップステージ率は、ロボット手術 16.2%、開胸手術 21.8%、胸腔鏡手術 12.3% であり、ロボット手術は開胸手術と同等の結果が得られ、特に気管分岐下のリンパ節においては胸腔鏡手術より有意に高いと報告している。われわれのデータでも背景をプロベンシティブスコアで調整したロボット手術と胸腔鏡手術の 49 例を比較したところ、ロボット手術では有意にリンパ節郭清個数が多く、特に肺門部のリンパ節郭清個数が多かった。<sup>13</sup> リンパ節郭清に関しては、もちろん郭清個数やアップグレード率のみで評価することができないが、ロボット手術ではリンパ節を破碎することなく正常構造物を残して一塊に郭清できる利点があり、このことが局所再発率の低下につながる事が考えられ、高いアップグレード率で正確な病期診断により、適切な術後補助療法につなげることもできる。

#### 進行肺癌に対する手術

近年、進行肺癌に対する術前治療が飛躍的に進歩する中で、ロボット手術症例も確実に増えている。2018 年に Veronesi ら<sup>14</sup>によって cN2, III 期の進行肺癌に対してロボット手術が安全にできることが報告され、特に術前治療後の 34 例に対してもコンバート 5 例、合併症 19 例、30 日/90 日死亡 0 例で良好な成績であった。前述した Huang ら<sup>9,10</sup>は cN2 肺癌に対するロボット手術と開胸の RCT で、開胸群と比較して出血量、ドレナージ期間、術後疼痛がロボット手術群で減少し、術後合併症や生存期間は開胸群とロボット手術群で同等であったと報告して

いる。Zeng ら<sup>15</sup>は、最近注目されている術前化学免疫療法後のロボット手術と胸腔鏡手術を比較して、ロボット手術は開胸移行率が低く、yp-N stage 評価とペインスコアが良好であったと報告している。われわれもこれまで術前化学放射線療法後の肺癌 5 症例に対して、ロボット手術を施行し (Figure 3)、大きな合併症なく安全に施行でき 18~48 カ月の経過で 3 例が無再発で、全例生存中の結果を得ている。肺癌に対する薬物治療が大きく進歩する中で、進行癌に対するロボット手術の役割が期待される。

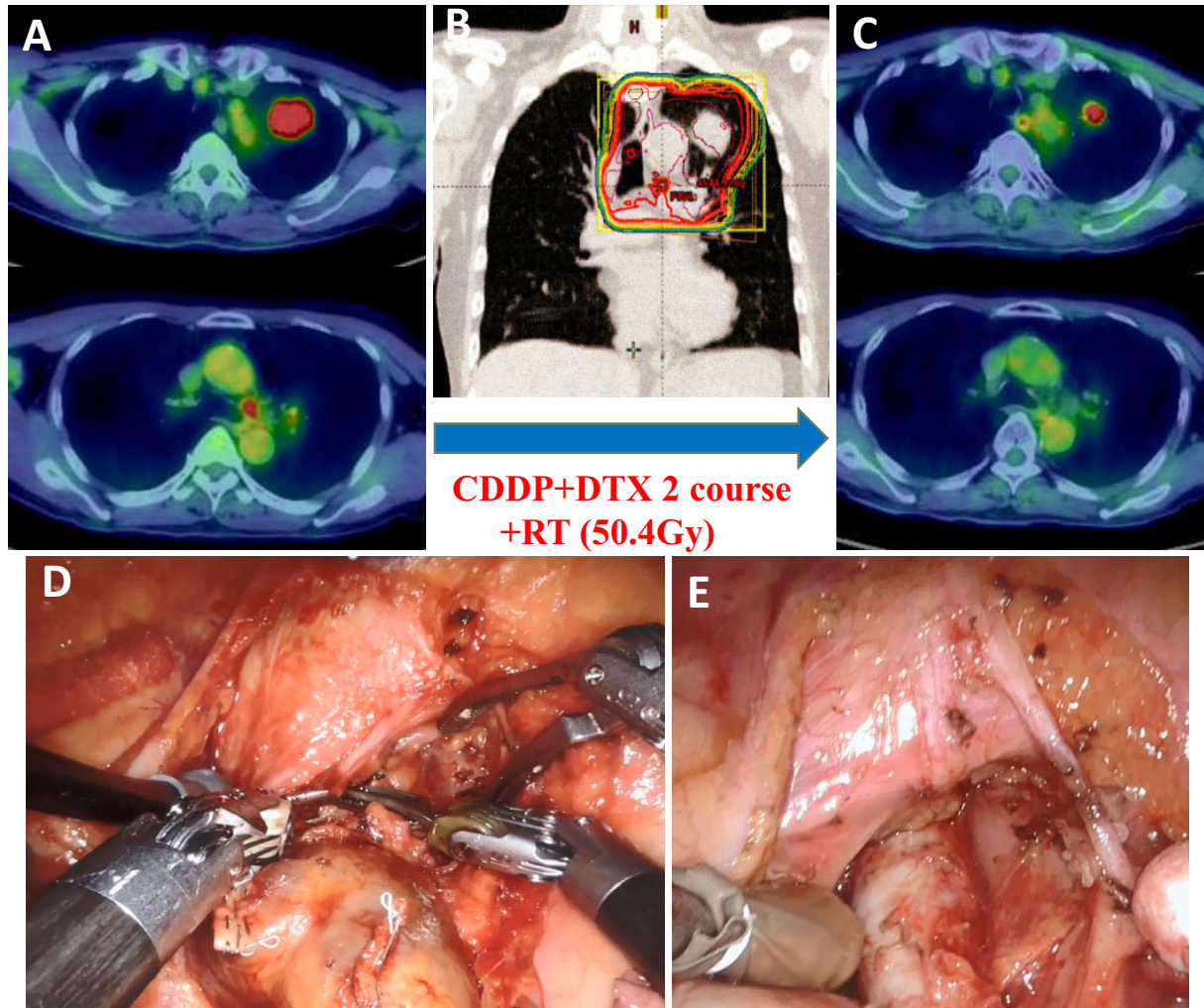
#### 区域切除

JCOG0802/WJOG4607L 試験 [肺野末梢小型非小細胞肺癌に対する肺葉切除と縮小切除 (区域切除) の第 III 相試験] で区域切除の有用性が証明<sup>16</sup>されて以降、手術件数が急速に増加し、複雑区域切除や亜区域合併切除などのより高度な手技も行われるようになっており、この点で精度の高いロボット手術は有用である。実際に本邦では Figure 1 に示すように、2022 年度には年間約 1,000 例の区域切除が行われているが、特にロボット手術で用いられる Tile-Pro 機能と ICG (Indocyanine Green) を用いた近赤外分光法 (Near-Infrared Fluorescence) が正確な区域切除を後押ししてくれる。<sup>17</sup> Figure 4 は当科における右肺上葉 S<sup>1b</sup>+S<sup>3</sup> 区域切除施行時の様子を示している。当科では 2023 年 6 月までに 102 例の区域切除を経験し、そのうち複雑区域切除が 57 例であり、切除マージンを確保するための亜区域を合併切除した症例が 11 例含まれるが、平均手術時間も 3 時間以下で安全に施行できている。Kneuertz ら<sup>18</sup>は米国 STS (The Society of Thoracic Surgeons) のデータベースを用いて、臨床病期 I 期の肺癌に対する区域切除をアプローチ別に比較して、ロボット手術と胸腔鏡手術は開胸手術と比較して、少ない合併症、短い在院日数で上回り、近年はロボット手術が急増していることを報告している。

区域切除において最も重要なことは適切な症例選択と手術における十分な健常マージンの確保であり、ロボット手術の今後のさらなる発展が確実な区域切除の施行には欠かせない。

#### 肥満患者に対する手術

BMI 高値の肥満患者に対する手術は、厚い胸壁による可動性制限を受けるためしばしば胸腔鏡手術では難渋する。ロボット手術の特徴は良好な可動域を有することであり、肥満患者の手術に有用と考えられる。実際に最近の報告で、Seder ら<sup>19</sup>は米国 STS のデータベースを用いて BMI 30 kg/m<sup>2</sup> 以上の肥満患者に対するロボット手術は、胸腔鏡手術と比較して開胸コンバート率が 5 倍以上高く肥満度に比例してその割合が上がること、その結果、胸腔鏡手術では在院日数が長く、術後合併症として呼吸



**Figure 3.** Robotic left upper lobectomy after preoperative chemoradiotherapy for left N2 lung cancer. **A.** Pre-treatment PET, **B.** preoperative chemoradiotherapy, **C.** post-treatment PET. **D.** Superior mediastinal lymphadenectomy. **E.** After superior mediastinal lymph node dissection.

不全の発生頻度が高くなると報告している。また、Liら<sup>20</sup>も BMI 24 kg/m<sup>2</sup> 以上の肥満患者 292 例の検討で、ロボット手術は胸腔鏡手術よりも有意にリンパ節郭清回数、ステーション数、手術時間、出血量、ドレーン排液量、術後合併症の発生頻度が良好であったと報告している。一般に日本人は欧米人に比較して肥満度は小さいが、BMI 24 kg/m<sup>2</sup> 以上でロボット手術にメリットがみられたことは大きな意義がある。

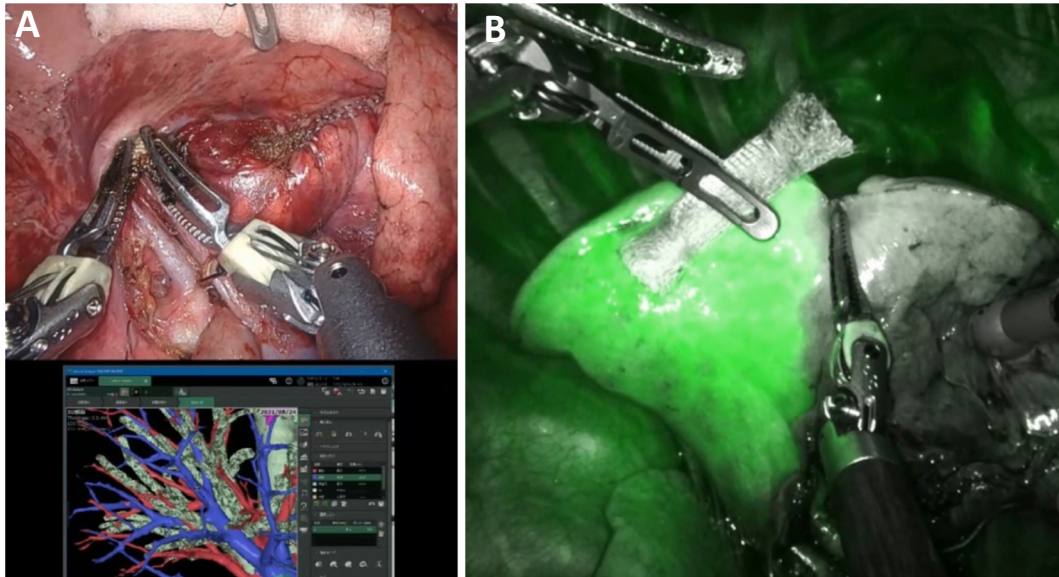
#### 不全分葉症例に対する手術

高度不全分葉があると胸腔鏡手術では一般的に高いコンバート率と術後合併症の頻度が上がることが知られている。一方、ロボット手術では肺門の剥離操作に優れており、不全分葉に対しても良好な手術操作ができることが期待される。Haoら<sup>21</sup>は、不全分葉に対するロボット手術 87 例を分葉良好な症例 120 例と比較して、手術時間、

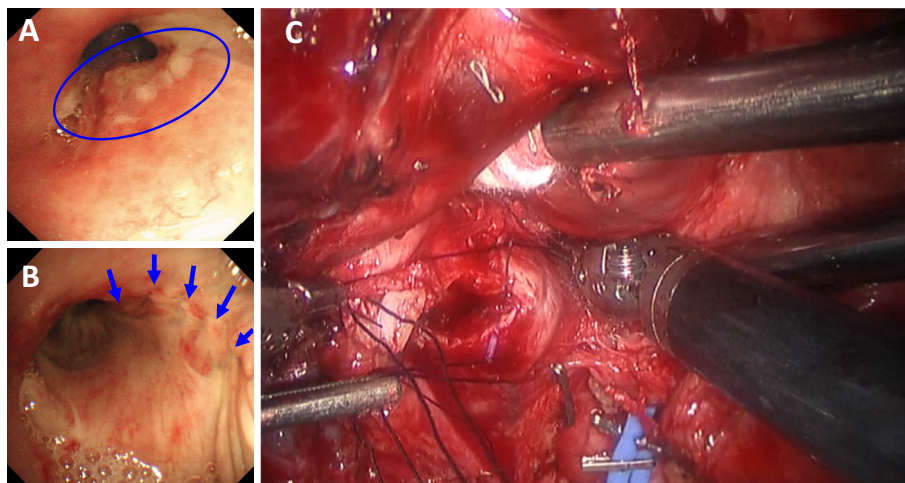
出血量、ドレーン期間、術後在院日数、肺瘻など術後合併症において有意差はなく、自動縫合器の使用量が増える分だけコストがかかると報告した。特に、ロボット手術においては肺門の前方と後方を剥離してトンネル作成をしていく方法 (Tunnel Technique) が有用であると述べている。われわれもロボット手術は見上げ操作による肺門の露出に優れているため、不全分葉症例に対しては肺門を先行処理して最後に葉間を作成するという Fisureless Approach という手技を多用している。このことにより肺瘻などの呼吸器合併症が減少し、本アプローチは肺気腫、間質性肺炎を合併した難易度が高い肺癌手術に対しても応用でき、ロボット手術のメリットと考えられる。

#### 気管支形成術

中枢発生の肺癌に対してはしばしば気管支形成術が行



**Figure 4.** Robot-assisted lung segmentectomy for lung cancer. **A.** Use of the Tile-Pro function. **B.** Drawing of intersegmental plane by indocyanine green (ICG) near-infrared fluorescence.

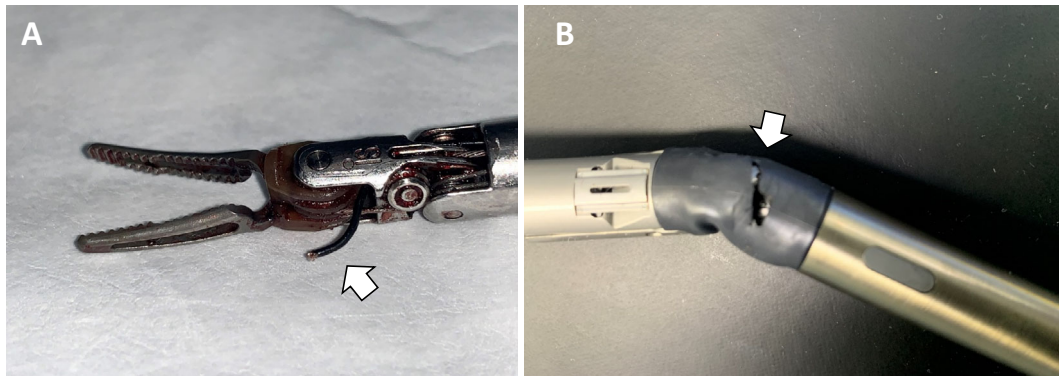


**Figure 5.** Robotic bronchoplasty for upper right hilar lung cancer. **A.** Preoperative bronchoscopy findings (tumor in the circle), **B.** postoperative bronchoscopy findings (arrow indicates the suture line). **C.** Robotic bronchial anastomosis using 3-0 Prolene sutures.

われるが、ロボット手術では卓越した縫合操作が可能であることから良い適応と考えられる。われわれは2013年に右上葉肺門部肺癌に対するロボット支援下気管支形成術の成功例を報告した (Figure 5).<sup>22</sup> 2016年には、Cerfolio<sup>23</sup>がロボット支援下気管支形成術を施行した8例について3-0 Vicryl糸を使用して単結紮で行う手技のコツを論じ、ロボット手術では触覚がないが、良好な操作性で十分に補えることを示した。最近ではQiuら<sup>24</sup>が気管支形成術を施行したロボット手術49例、胸腔鏡手術

73例、開胸手術66例を比較して90日死亡や合併症に差はなく、ロボット手術では出血量、手術時間、ドレーン留置期間が有意に良好で、気管支断端の陽性やコンバート症例は1例もなかったと報告している。手術手技としては、3-0 Proleneを用いた半周連続縫合が有用であると述べている。

以上のように、ロボット手術は呼吸器外科の領域に広く浸透しささまざまな手技に応用されており、胸腔鏡手術の弱点を補うオプション手術としての地位を確立してき



**Figure 6.** Equipment breakage in robotic surgery. **A.** Bipolar forceps breakage, **B.** automatic suturing device cover breakage.

ている。Baste<sup>25</sup>は、より複雑で高難度な肺癌手術症例こそ、ロボットの技術を活かすことができると述べており、まさに今後のロボット手術の役割を言い得ていると思われる。

### 肺癌に対するロボット手術の中・長期成績

肺癌に対するロボット手術の予後は、いまだ症例数や観察期間が十分とは言えない中で、2018年にCerfolioら<sup>26</sup>は、1,339例の解析で、術後30日、90日死亡がそれぞれ0.2%、0.5%、5年生存率はIA期83%、IB期77%、IIA期68%、IIB期70%、IIIA期62%、IIIB期31%と良好な成績を報告した。われわれも2020年に背景をプロペンシティブスコアで調整した中で、全体の5年全生存率が胸腔鏡手術76.9%に対して、ロボット手術91.2%と有意差はないが、むしろ良好な成績であることを報告した。<sup>13</sup> Kneuert<sup>27</sup>らによる大規模なSTSデータベースを使用した平均観察期間45カ月の解析では、ロボット手術、胸腔鏡手術、開胸手術の比較で、それぞれ局所再発が7%、6%、8%、遠隔再発が14%、18%、17%、全体の5年全生存率は63%、55%、65%であり、少なくともロボット手術は、他のアプローチと遜色なく、良好な予後が得られている。

### ロボット手術のリスクマネジメント

ロボット手術のリスクについて論じた論文はこれまで多数ある。そのほとんどは、回避可能な術中の医原性のトラブルである。2014年にPaulら<sup>28</sup>は米国の後方視的研究で、2,498例のロボット手術と37,595例の胸腔鏡手術における肺葉切除を比較した結果、周術期死亡率や全合併症率は両群で変わらないが、ロボット手術においては、術中の医原性合併症、特に術中の血管損傷による出血のリスクが胸腔鏡手術より高いことを報告した（調整オッズ比：2.64、95%信頼区間、1.58～4.43）。さらに大規

模データベースである米国FDAの報告では、14年間1,745,000例の全領域のロボット手術における解析で、術中損傷もしくは死亡は0.1%の頻度で生じ、胸部外科手術（心大血管手術を含む）では開胸コンバージョン率が16.8%と高く（主たる原因は血管損傷による出血）、泌尿器科、産婦人科、一般外科と比較してそのリスク比は2.2倍であったとされている。<sup>29</sup> コンバージョンに関する解析は近年多く、Herreraら<sup>30</sup>は、ロボット手術、胸腔鏡手術を比較して3.6%と12.9%で圧倒的にロボット手術が少なく、しかも胸腔鏡手術のコンバージョンの理由は解剖学的理由による手術の困難さであったとされている。一方で、全体に占める血管損傷によるコンバージョン率は胸腔鏡手術の14%に対してロボット手術では28.4%と高率であること、ただし、緊急開胸率には差がなかったことも報告している。最も注意すべきである血管損傷に関して近年衝撃的であったのは、Caoら<sup>31</sup>の報告で、欧米の熟練したロボット外科医から、肺切除1,810例中35例（1.9%）に術中壊滅的と言われる出血イベントを生じたことと報告されたことである。好発部位は左上葉、肺動脈であり、リスク因子としては進行した臨床病期、呼吸機能低下、術前放射線療法があげられた。結果的には、死亡例は2例（5.7%）で、何とかトラブルシューティングできた症例が多かったことは不幸中の幸いである。

また、手術支援ロボットはシステム自体や鉗子などの機器にトラブルを生じることもある（Figure 6）。米国FDAの報告では、14年間の全ロボット手術で0.6%に重篤な有害事象が生じ、その75.9%が機器の異常に起因するものであった。<sup>29</sup> ロボット手術ではかかる特性を鑑み、臨床工学技士が大変重要な存在であり、平素よりの確な保守点検の実施、関連メーカーとの橋渡しをする役割がある。

**Table 2.** List of Representative Surgical Robots Expected in the Future

Company	Country	Features of surgical robot	Name of robot	Regulatory approval area
Intuitive Surgical Inc.	USA	Standard surgical robot with 4 arms	da Vinci X, Xi	All areas
Intuitive Surgical Inc.	USA	Surgical robot for single port	da Vinci Sp	All areas except intercostal approach
TransEnterix Inc.	USA	Haptic presentation, visual camera operation function surgical robot	Senhance surgical system	Assistance in laparoscopic surgery
Medtronic plc.	Ireland	Surgical robot of multi-arm with isolation unit	Hugo	Urology Gynecology
Verb Surgical Inc.	USA	Safety surgical robots with AI integration	Ottava	—
CMR Surgical Limited	England	Small sized single-arm surgical robot	Versius	—
Avateramedical GnbH	Germany	Surgical robot with 4 arms, single-use forceps	Avatera	—
Medicaroid Corp.	Japan	Surgical robot with thin articulated arm	Hinotori	Urology · Gynecology · Gastroenterological Surgery
Riverfield Inc.	Japan	Pneumatically powered three-arm surgical robot	Saroa	All areas
A-Traction Inc.	Japan	Assistive robot for surgical instruments	ANSUR	Assistance in laparoscopic surgery

**ロボット手術の課題**

現在呼吸器外科のロボット手術はダビンチが主力機種であるが、アプローチ方法や手術手技は多種多彩である。当科ではメーカーが推奨する標準的な手法を用いており、CO<sub>2</sub>の送気による気胸作成下に4アームを使用したCPRL-4 (Completely Portal Robotic Lobectomy 4 Arm法)を行う。ポート位置は下位肋間に設定する見上げ式アプローチであるが、対面式VATSと同様に設定する前方アプローチを採用する施設もある。Mattioniら<sup>32</sup>は、アプローチ方法や手術手技について詳細に解析し、ポート位置、ポート数、CO<sub>2</sub>送気の有無、使用する鉗子などさまざまな相違はあるが、いずれにしてもロボット手術は良好な成績であり、有用な手術であることは明らかであるとしている。その中で近年注目されている単孔式アプローチに関しては、Gonzalez-Rivasら<sup>33</sup>が、ダビンチXiで3アームを使用して3~4cmの切開から彎曲鉗子でアシストしながら、肺葉切除のみならず区域切除、気管支形成術、肺全摘術も可能であると述べている。しかし、本手法は鉗子やカメラの干渉を生じないように工夫が必要であるし、ダビンチSpという単孔用の手術支援ロボットも薬事承認されたが、ロボット鉗子を通す外套が2.5cm径と大きいため、肋間アプローチは認められていない。現状では肺癌に対する単孔式ロボット手術を行うには技術的ハードルは高いと言えるだろう。

現在のロボット手術の課題は、何とんでも高いコストであるが、カメラ操作をコンソール医師が行うため確実に人件費が減らせること、新型手術支援ロボットの競

合により鉗子などの価格低下が期待されることなどがメリットとしてあげられる。しかし、さらなる対価を得るにはロボット手術のベネフィットの立証による保険上の加算の取得など、今後のロボット手術の発展のために解決しなければならないことが山積している。特にエビデンスの作成は厚労省からも指摘されているところであり、現在進行中の研究成果が期待される。また、ロボット手術を発展させるためにはいかに教育して若手を育成し、既存の胸腔鏡手術、開胸手術との住み分けをしていくかも重要な課題である。Ozekiら<sup>34</sup>が指摘しているように、施設の実情にあったQI(Quality Indicator)をセッティングしながら、手術時間をコントロールして増加する呼吸器外科の手術件数を効率よく行っていくことも重要である。

**ロボット手術の将来展望**

現在、世界シェアの7~8割を占めるほど圧倒的な地位を占めるダビンチ(Intuitive Surgical Inc.)の特許の多くは2019年までに期限が切れて、新型手術支援ロボットの開発競争が一気に加速している。各社は軽量化や機能の簡略化などによりダビンチを大幅に下回る価格に抑えてシェア獲得を目指している。Table 2に将来期待される代表的手術支援ロボットの一覧を示した。現時点で、本邦で呼吸器外科領域において薬事承認が取れているのはダビンチX, Xi, Sp(Intuitive Surgical Inc.), Saroa(Riverfield Inc.)のみであるが、Hinotori(Medicaroid Corp.)やHugo(Medtronic plc.)も薬事申請に向けて準備中である。次々と開発が進む手術支援ロボットをみれば、ダビ



ンチー強の時代から、優れた手術支援ロボットが生き残る競争の時代に入ってきていることは間違いない。

既存の手術支援ロボットには膨大なデータが蓄積されており、外科医がどのような手技を行ったかを容易に解析できる。現在すでに手術支援ロボットダビンチではモバイルアプリの「My Intuitive」という形で手術のログデータを可視化して、外科医のスキルと治療成績の向上を確認することも可能になっている。またこれらのビッグデータはAI (Artificial intelligence) の深層学習 (ディープラーニング) にも役立ち、外科医を指導してくれるAIの実装もやがて行われるだろう。近未来のロボット手術を考えた時には、手術支援ロボットにこのAIによるナビゲーション機能を導入することが、外科医にとって最も手軽に恩恵を受けることになると思われる。将来、人間がどこまでロボット工学技術との融合を果たして、安全で確実な外科手術ができるようになるのか興味は尽きない。高性能の手術支援ロボットにより、新たな道が切り開かれることが期待されている。

## おわりに

呼吸器外科のロボット手術は着実に普及し、幅広く適応を拡大しながら症例が蓄積されてきた。しかしながら、いまだ有用性を示すエビデンスは証明されていない。ロボット手術のメリットである精緻な操作が、どのようなベネフィットをもたらすか検証が急がれる。

新たなデバイスや新型手術支援ロボットの登場でさらなる発展に期待がかかるが、解決しなければならない課題も多い。その中で、呼吸器外科の手術は、わずかなミスが甚大になることもあるため、常日頃からメディカルスタッフの間で綿密な連携をとる必要がある。難治性の肺癌に対してロボット手術のメリットが活かされれば、外科医と患者の双方にとって大きなメリットとなり、ロボット手術をより魅力的な低侵襲手術として確立するためにも大切である。

本論文内容に関連する著者の利益相反：中村廣繁 [日当・講演料] インテュイティブサージカル合同会社、メディカロイド株式会社、ジョンソンエンドジョンソン株式会社、春木朋広 [日当・講演料] インテュイティブサージカル合同会社、ジョンソンエンドジョンソン株式会社

## REFERENCES

1. Nakamura H, Taniguchi Y. Robot-assisted thoracoscopic surgery: current status and prospects. *Gen Thorac Cardiovasc Surg.* 2013;61:127-132.
2. Júnior ER, Terra MR. Robotic lung resection: a narrative review of the current role on primary lung cancer treatment. *J Thorac Dis.* 2022;14:5039-5055.
3. Aiolfi A, Nosotti M, Micheletto G, Khor D, Bonitta G, Perali C, et al. Pulmonary lobectomy for cancer: Systematic review and network meta-analysis comparing open, video-assisted thoracic surgery, and robotic approach. *Surgery.* 2021;169:436-446.
4. Wu H, Jin R, Yang S, Park BJ, Li H. Long-term and short-term outcomes of robot- versus video-assisted anatomic lung resection in lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2021;59:732-740.
5. Zhang J, Feng Q, Huang Y, Ouyang L, Luo F. Updated evaluation of robotic- and video-assisted thoracoscopic lobectomy or segmentectomy for lung cancer: A systematic review and meta-analysis. *Front Oncol.* 2022;12:853530 doi: 10.3389/fonc.2022.853530. eCollection 2022.
6. Kent MS, Hartwig MG, Vallières E, Abbas AE, Cerfolio RJ, Dylewski MR, et al. Pulmonary open, robotic, and thoracoscopic lobectomy (PORTaL) study: An analysis of 5721 case. *Ann Surg.* 2023;277:528-533.
7. Veronesi G, Abbas AE, Muriana P, Lembo R, Bottoni E, Perroni G, et al. Perioperative outcome of robotic approach versus manual videothoracoscopic major resection in patients affected by early lung cancer: results of a randomized multicentric study (ROMAN Study). *Front Oncol.* 2021;11:726408 doi: 10.3389/fonc.2021.726408. eCollection 2021.
8. Jin R, Zheng Y, Yuan Y, Han D, Cao Y, Zhang Y, et al. Robotic-assisted versus video-assisted thoracoscopic lobectomy: short-term results of a randomized clinical trial (RVlob Trial). *Ann Surg.* 2022;275:295-302.
9. Huang J, Li C, Li H, Lv F, Jiang L, Lin H, et al. Robot-assisted thoracoscopic surgery versus thoracotomy for c-N2 stage NSCLC: short-term outcomes of a randomized trial. *Transl Lung Cancer Res.* 2019;8:951-958.
10. Huang J, Tian Y, Li C, Shen Y, Li H, Lv F, et al. Robotic-assisted thoracic surgery reduces perioperative complications and achieves a similar long-term survival profile as posterolateral thoracotomy in clinical N2 stage non-small cell lung cancer patients: a multicenter, randomized, controlled trial. *Transl Lung Cancer Res.* 2021;10:4281-4292.
11. Nakamura H, Suda T, Ikeda N, Okada M, Date H, Oda M, et al. Initial results of robot-assisted thoracoscopic surgery in Japan. *Gen Thorac Cardiovasc Surg.* 2014;62:720-725.
12. Kneuert PJ, Cheufou DH, D'Souza DM, Mardanzai K, Abdel-Rasoul M, Theegarten D, et al. Propensity-score adjusted comparison of pathologic nodal upstaging by robotic, video-assisted thoracoscopic, and open lobectomy for non-small cell lung cancer. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2019;158:1457-1466.e2.
13. Haruki T, Kubouchi Y, Takagi Y, Kidokoro Y, Matsui S, Nakanishi A, et al. Comparison of medium-term survival outcomes between robot-assisted thoracoscopic surgery and video-assisted thoracoscopic surgery in treating primary lung cancer. *Gen Thorac Cardiovasc Surg.* 2020;68:984-992.
14. Veronesi G, Park B, Cerfolio R, Dylewski M, Torker A, Fontaine JP, et al. Robotic resection of Stage III lung cancer: an international retrospective study. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2018;54:912-919.

15. Zeng J, Yi B, Chang R, Chen Y, Yu Z, Gao Y. Safety and feasibility of robotic-assisted thoracic surgery after neoadjuvant chemioimmunotherapy in non-small cell lung cancer. *Front Oncol.* 2023;13:1134713 doi: 10.3389/fonc.2023.1134713. eCollection 2023.
16. Saji H, Okada M, Tsuboi M, Nakajima R, Suzuki K, Aokage K, et al. Segmentectomy versus lobectomy in small-sized peripheral non-small-cell lung cancer (JCOG 0802/WJOG4607L): a multicentre, open-label, phase 3, randomised, controlled, non-inferiority trial. *Lancet.* 2022;399:1607-1617.
17. Ferrari-Light D, Geraci TC, Sasankan P, Cerfolio RJ. The Utility of Near-Infrared Fluorescence and Indocyanine Green During Robotic Pulmonary Resection. *Front Surg.* 2019;6:47.
18. Kneuert PJ, Abdel-Rasoul M, D'Souza DM, Zhao J, Merritt RE. Segmentectomy for clinical stage I non-small cell lung cancer: National benchmarks for nodal staging and outcomes by operative approach. *Cancer.* 2022;128:1483-1492.
19. Seder CW, Farrokhyar F, Nayak R, Baste JM, Patel Y, Agzarian J, et al. Robotic vs thoracoscopic anatomic lung resection in obese patients: A propensity-adjusted analysis. *Ann Thorac Surg.* 2022;114:1879-1885.
20. Li R, Ma Z, Li Y, Qu C, Qiu J, Zhang Y, et al. Robotic-assisted thoracoscopic surgery improves perioperative outcomes in overweight and obese patients with non-small-cell lung cancer undergoing lobectomy: A propensity score matching analysis. *Thorac Cancer.* 2022;13:2606-2615.
21. Hao X, Jun W, Xiaoyan C, Linyou Z. Robot-assisted thoracic surgery for lung cancer patients with incomplete fissure. *Surg Endosc.* 2022;36:8290-8297.
22. Nakamura H, Taniguchi Y, Miwa K, Fujioka S, Matsuoka Y, Kubouchi Y. A successful case of robotic bronchoplastic lobectomy for lung cancer. *Ann Thorac Cardiovasc Surg.* 2013;19:478-480.
23. Cerfolio RJ. Robotic sleeve lobectomy: technical details and early results. *J Thorac Dis.* 2016;8(Suppl 2):S223-S226.
24. Qiu T, Zhao Y, Xuan Y, Qin Y, Niu Z, Shen Y, et al. Robotic sleeve lobectomy for centrally located non-small cell lung cancer: A propensity score-weighted comparison with thoracoscopic and open surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2020;160:838-846.e2.
25. Baste JM. Locally advanced N2 non-small cell lung cancer and the robotic platform: are we asking the right question? *J Thorac Dis.* 2019;11(Suppl 9):S1184-S1185.
26. Cerfolio RJ, Ghanim AF, Dylewski M, Veronesi G, Spaggiari L, Park BJ. The long-term survival of robotic lobectomy for non-small cell lung cancer: a multi-institutional study. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2018;155:778-786.
27. Kneuert PJ, D'Souza DM, Richardson M, Abdel-Rasoul M, Moffatt-Bruce SD, Merritt RE. Long-term oncologic outcomes after robotic lobectomy for early-stage non-small-cell lung cancer versus video-assisted thoracoscopic and open thoracotomy approach. *Clin Lung Cancer.* 2020;21:214-224.e2.
28. Paul S, Jalbert J, Isaacs AJ, Altorki NK, Isom OW, Sedrakyan A. Comparative effectiveness of robotic-assisted vs thoracoscopic lobectomy. *Chest.* 2014;146:1505-1512.
29. Alemzadeh H, Raman J, Leveson N, Kalbarczyk Z, Iyer RK. Adverse events in robotic surgery: A retrospective study of 14 years of FDA data. *PLoS One.* 2016;11:e0151470 doi: 10.1371/journal.pone.0151470. eCollection 2016.
30. Herrera LJ, Schumacher LY, Hartwig MG, Bakhos CT, Reddy RM, Vallières E, et al. Pulmonary open, robotic, and thoracoscopic lobectomy study: Outcomes and risk factors of conversion during minimally invasive lobectomy. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2023;166:251-262.e3.
31. Cao C, Cerfolio RJ, Louie BE, Melfi F, Veronesi G, Razzak R, et al. Incidence, management, and outcomes of intraoperative catastrophes during robotic pulmonary resection. *Ann Thorac Surg.* 2019;108:1498-1504.
32. Mattioni G, Palleschi A, Mendogni P, Tosi D. Approaches and outcomes of Robotic-Assisted Thoracic Surgery (RATS) for lung cancer: a narrative review. *J Robot Surg.* 2023;17:797-809 doi: 10.1007/s11701-022-01512-8. Epub 2022 Dec 21.
33. Gonzalez-Rivas D, Bosinceanu M, Motas N, Manolache V. Uniportal robotic-assisted thoracic surgery for lung resections. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2022;62:ezac410 doi: 10.1093/ejcts/ezac410.
34. Ozeki N, Ueno H, Saeki J, Kadomatsu Y, Kato T, Nakamura S, et al. Setting a quality indicator for actual surgery time relative to scheduled surgery time in the context of increasing robotic-assisted thoracic surgery cases. *Gen Thorac Cardiovasc Surg.* 2023;71:396-402.