

綜 説

早期肺癌に対する最新の外科治療 信大式低侵襲精密肺区域切除術の実際

江口 隆 清水公裕*

信州大学医学部外科学教室呼吸器外科学分野

An Up-to-date Overview of Surgical Treatment for Early-stage Lung Cancer — Minimally Invasive *Precision* Lung Segmentectomy at Shinshu University

Takashi EGUCHI and Kimihiro SHIMIZU

*Division of General Thoracic Surgery, Department of Surgery, Shinshu University School of Medicine***Key words:** lung segmentectomy, early-stage lung cancer, minimally invasive surgery

肺区域切除, 早期肺癌, 低侵襲手術

I Abstract

近年の小型早期肺癌の増加と高齢化に伴い、胸腔鏡手術およびロボット支援下に行われる低侵襲肺区域切除のニーズは増加している。しかし、肺区域切除術は、呼吸器外科手術の中でも難易度の高い手術とされており、本邦における全術式における割合は10%程度である。難易度が高い理由として、① 頻繁に破格を伴う複雑な区域および亜区域解剖を熟知する必要性に加え、② 特に腫瘍が小型で深部に存在する場合、術中の腫瘍局在確認ができず、十分な切除マージンを得ることが難しいことなどが挙げられる。本稿では、低侵襲肺区域切除術を精細かつ安全・確実に施行するうえで重要となる術前シミュレーション・術中ナビゲーション、マーキングによる術中の腫瘍局在確認に焦点を当て、過去の研究結果と最新の技術革新に基づいたエビデンスを概説する。さらに、信州大学で実際に行っている信大式低侵襲精密肺区域切除術の実際について解説する。

II 背 景

従来の癌治療は、1つの治療法を全ての患者へ同じように提供する、“one-size (drug, treatment)-fits-all”

が主体であった。しかし、近年の腫瘍学における目まぐるしい発展により、患者一人ひとりの病態や遺伝情報などに基づいた精密医療“precision medicine”（個別化医療“personalized medicine”，テーラーメイド医療“tailored medicine”と同義）が急速に普及している。その反面、早期肺癌の外科治療においては、1995年に北米で肺葉切除と縮小手術（部分切除と区域切除の両者を含む）のランダム化試験（LCSG 821）における肺葉切除の優位性が発表されて以来、現在に至るまで肺葉切除が世界の標準手術となっている¹⁾。しかし、実臨床においては、高齢化社会を反映し、肺機能を温存する縮小手術が必要に迫られて盛んに行われているのも事実である²⁾。特に、縮小手術の中でも、解剖学的に18に区分される肺区域の単位で切除する肺区域切除は、近年、小型肺癌の治療において、葉切除に対する予後の非劣性と良好な呼吸機能温存が得られる術式であることが、本邦を中心に報告されてきている³⁾。そして、その集大成として、小型肺癌に対する葉切除と区域切除を比較した多施設共同、前向きランダム化試験（JCOG0802）の結果が、2021年中に公表される予定であり、その試験結果如何によっては、四半世紀変わらなかった早期小型肺癌に対する標準術式（肺葉切除）が、この日本発のデータにより区域切除に変わる可能性がある（Fig. 1）。

また、胸腔鏡手術やロボット支援手術を含む低侵襲手術は、従来の開胸手術と比較し、術後疼痛の軽減、QOL改善、術後合併症の軽減、そして非癌死の軽減

* 別刷請求先：清水公裕 〒390-8621

松本市旭3-1-1 信州大学医学部外科学教室

呼吸器外科学分野

E-mail: kmshimizu@gmail.com

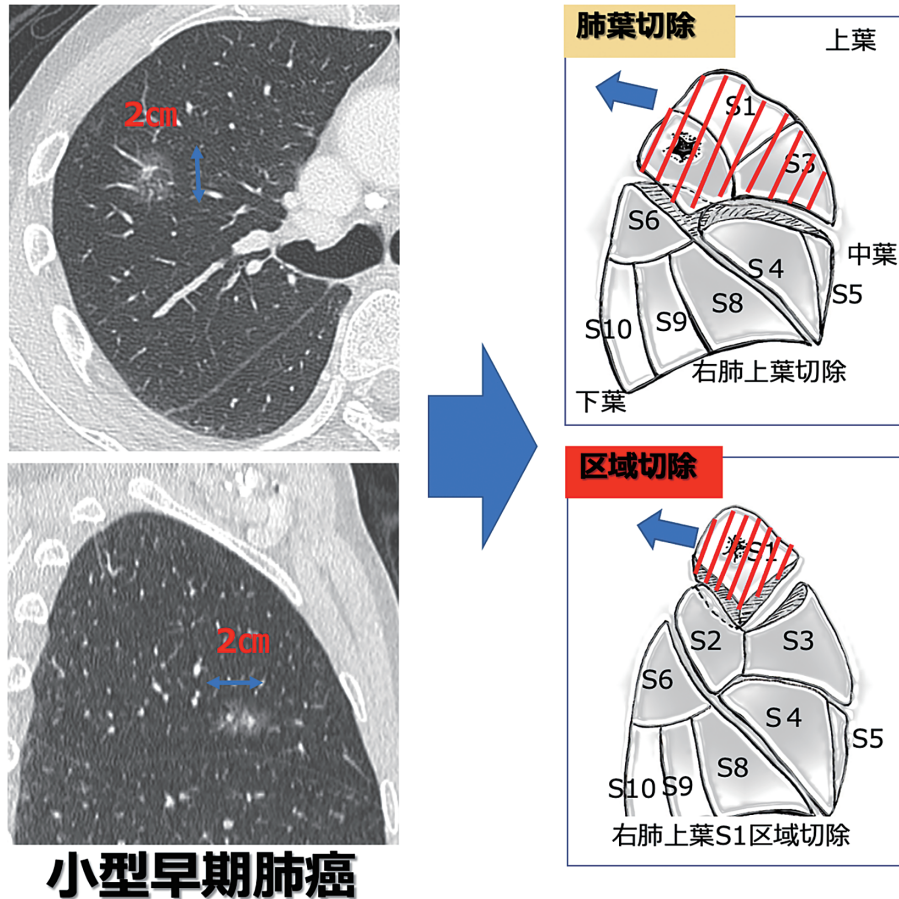


Fig. 1 小型肺癌に対する外科治療：肺葉切除から区域切除へ

従来では、左のCTで示すような、小型で淡い（すりガラス影）早期肺癌に対しても、肺癌の標準術式である肺葉切除が行われてきたが（右上）、今後は区域切除で肺機能を温存しながら根治できる可能性があることが分かってきた（右下）。

に寄与するといった報告が増えており、その普及が進んでいる⁴⁾⁻⁶⁾。近年の米国の全国データに基づく解析結果からは、これらの胸腔鏡手術やロボット支援下に低侵襲肺区域切除術が行われることが多くなり、腫瘍学的な予後も開胸区域切除と比べて同等と報告されている⁷⁾。

一般的に肺区域切除術は、呼吸器外科手術の中でも、難易度の高い手術とされている。その理由として、① 頻繁に破格を伴う複雑な区域および亜区域解剖を熟知する必要があること、また、② 特に腫瘍が深部に存在して触知困難な場合、術中の腫瘍局在確認と十分な切除断端距離を得ることが困難であること、などが挙げられる⁸⁾。これらの問題点を克服するために、3次元（3D）CT画像を用いた個々の解剖学的特徴に基づく術前シミュレーション⁹⁾⁻¹⁴⁾、術中の腫瘍局在確認の工夫¹⁵⁾⁻¹⁷⁾など、様々な取り組みが報告されている。

本稿では、胸腔鏡手術やロボット支援下に行われる低侵襲肺区域切除術を精細かつ安全・確実に施行する

ために重要な術前シミュレーションおよび術中ナビゲーション、およびマーキングによる術中の腫瘍局在確認に焦点を当て、過去の研究結果と最新の技術革新に基づいたエビデンスを概説する。また、信州大学において行っている①最新の3DCT解析ソフトウェアによる区域切除プランニングに基づいた術前シミュレーション・術中ナビゲーション、そして、②近距離通信で使用される radio-frequency identification (RFID) 技術を用いた気管支鏡下マーキングと術中腫瘍局在のリアルタイム・モニタリングの実践についても解説する。

Ⅲ 低侵襲肺区域切除

肺区域切除術は、単独区域切除だけでも18種類あるが、複数区域切除や亜区域切除の組み合わせなども含めると、そのバリエーションは無数に存在する。しかし、その解剖学的特性から単純（典型的）および複雑（非典型的）区域切除の2種類に分類することができる¹⁸⁾¹⁹⁾。単純区域切除にはS6区域切除、底区切除、

上区切除, 舌区切除が含まれ, その特徴は, 切離する区域間面が1平面で形成されることである。これに対し, 複雑区域切除は2つ以上の区域間面を切離する必要があるもので, 上記の単純区域切除に含まれない区域切除のすべてが含まれる²⁰⁾⁻²²⁾。複雑区域切除は, 複数の区域間を切離する必要があるというだけでなく, 肺門部操作においても, 一般的に単純区域切除と比較して難易度が高い。特に低侵襲手術においては, 複雑区域切除はさらに高度な技術が求められるため, 単純区域切除の方が比較的普及している¹⁸⁾²³⁾。

Okadaらは, 2005年に“hybrid VATS”と呼ばれる小開胸創からの直視を併用した胸腔鏡手術を提唱した²⁴⁾。その後, この方法を用いた複雑区域切除術の技術的・腫瘍学的な妥当性が報告されている¹⁹⁾²⁵⁾。これに対し, 完全鏡視下手術は原則的に胸腔鏡によるモニター視のみで行われる。最近では, 胸腔鏡と操作用の鉗子すべてを1つのポートから挿入する単孔式胸腔鏡手術も増加している。これらのアプローチによる複雑区域切除の妥当性も報告されているが²²⁾²⁶⁾, そのラーニングカーブや一般化の可能性については明らかではない。近年, 胸部外科領域におけるロボット支援手術は普及しつつある。ロボット手術は一般的な胸腔鏡手術と比較して, その人間工学に基づくデザイン, コンソールでの3次元視, 手ブレ防止機能, 繊細な操作性など, 複数の利点が報告されており, これらは低侵襲区域切除術を行う上で有用であると考えられている²⁷⁾⁻²⁹⁾。

IV 区域切除プランニング・ナビゲーション

基本的な区域切除の手術手順は葉切除と同様であるが, 以下に挙げるような手技は, 主に区域切除が必要となるものである。①肺動脈・気管支の各区域・亜区域分枝の同定と切離あるいは温存。②区域間静脈の同定とそれに沿った中枢側区域間の剥離。③末梢側区域間の同定と切離。これらの手技を含む肺区域切除を安全・確実にを行うために, 我々呼吸器外科医は術中に以下に挙げるような判断あるいは意思決定 surgical decision making を行う必要がある。i) どの分枝を切離あるいは温存するか, ii) 気管支, 肺動脈, 肺静脈の適切な切離の順序, iii) 予定した切除で十分なマージンが確保できるか, iv) 腫瘍の局在と区域間面との位置関係。ところが, 実際の区域解剖は破格も多く複雑で, このような意思決定を行う上で, 患者一人ひとりの解剖に基づく区域切除プランニング・術前シミュレーションおよび術中ナビゲーションが有用となる。

A 手術に即した区域解剖分類と術前区域切除プランニング

肺区域切除を行う上で, 肺門部血管・気管支など詳細な解剖に関する情報を術前に収集し, それらの位置関係・配置を立体的・空間的に理解しておくことは肝要である。区域および亜区域レベルの血管・気管支において, それらの分岐数, 起始部, 破格などの組み合わせは無数に存在する一方で, パターン化する試みもなされている⁸⁾³⁰⁾⁻³²⁾。ボリュームレンダリングに基づく3DCT画像は, 各症例における術前の血管・気管支の分岐や破格の確認と, 解剖学的パターンの分類に有用である¹²⁾⁻¹⁴⁾。さらに, 3DCTに基づく切除プランニング・術前シミュレーションは, 外科チーム内において術式, 切除範囲に関するコンセンサスを得ることに有用である。解剖学的な特徴は手術戦略に影響することもある。我々はこれまでに右上葉における単純化した3D解剖モデルを作成し⁸⁾, 実臨床において, このモデルを用いて区域間静脈へのアプローチを決定・実践し, その技術的な有用性と, 許容されるアウトカムを報告している³³⁾。

B 術中ナビゲーション

上述の切除プランニング・術前シミュレーションによって十分な理解が得られたとしても, 術中の解剖認識においては次に挙げるような問題が残る: ①3DCT所見の誤認識に基づく, 術前計画と実際の手術方針における相違, ②実際の解剖に関する認識の外科医間における相違。しかし, 3DCT画像を用いて術中ナビゲーションを行うことにより, 術者および助手には実際の解剖認識についての3DCT所見に基づく協議・確認が可能となる。これは外科医間でコンセンサスを得ながら安全で確実な区域切除を行う上で重要である⁹⁾¹⁸⁾。術中ナビゲーションのための3DCT画像は, 術者・助手の隣に設置したモニターや, 滅菌バッグに入れたタブレットデバイスを用いて術中に確認する工夫が報告されている⁹⁾¹⁰⁾。

V 小型腫瘍の局在確認

CT発見の小結節, 特に深部に存在するすりガラス結節の局在を術中に触診で確認することは, 開胸手術においても困難な場合があり, 低侵襲手術では腫瘍触診がより困難となる。ロボット支援手術では基本的に触診は不可能であり, 鏡視下手術の場合, 指一本で触診を行うことはできても, 両手を使った触診はできない。したがって, 特に低侵襲手術においては, 触診

に頼らない腫瘍の局在確認が肝要であり、これまでに様々な方法が報告されている。本稿ではそれらをマーカー留置の有無とそのアプローチに基づき、3つのカテゴリーに分類した：① CT ガイド下マーキング、② 気管支鏡下マーキング、③ 術中超音波（マーカーなし）。Table 1に各方法の特徴についてまとめた。マーキング方法の選択において考慮すべき点は、安全性、技術的な実現可能性、正確性、そして、リアルタイムの腫瘍局在確認が可能かどうか、などである。

A CT ガイド下経皮マーキング

CT ガイド下経皮マーキングは、術前にCTにより腫瘍の位置を確認しながら、マーカーを経皮的に肺内に留置するものである。この方法で使用されるマーカーとして、フックワイヤー³⁴⁾³⁵⁾、マイクロコイル¹⁶⁾³⁶⁾、色素³⁷⁾³⁸⁾、造影剤³⁹⁾、放射性同位物質⁴⁰⁾⁴¹⁾などが挙げられる。CT ガイド下経皮マーキングにおいては、肺尖部、肩甲骨に隠れてしまう背側の領域、肺門部、横隔膜近傍の腫瘍に対して物理的に到達が難しい場合や、血管や周囲臓器損傷などの危険性が高い場合があり、他のマーキング方法を検討するなどの対応が必要である。また、マーカーは臓側胸膜・末梢の肺実質を通過して留置されるため、気胸、肺内出血、血胸、空気塞栓などの合併症が報告されている³⁴⁾³⁶⁾。

フックワイヤー法は、最も広く普及している肺腫瘍の局在確認方法の一つである³⁵⁾。マーカー先端は金属性で、留置された組織から抜けにくい形状となっており、先端部からナイロン糸が連続し、このナイロン糸を胸腔内で視認することができる。マーカーが装着された針をCTガイド下に刺入し、留置後のCTによりマーカーと腫瘍の正確な位置関係を術前に把握することができる。術中は、胸膜面に出ている糸を胸腔鏡下に容易に確認することができ、透視など他のモダリティを必要としない。フックワイヤー法での最も高頻度な合併症はマーカーの移動・脱落であるが⁴²⁾、他に上述のCTガイド下マーキングに伴う合併症が生じる可能性もある。特に、空気塞栓に関しては、フックワイヤー法を行った症例での報告を認めるのみである⁴³⁾。Horanらはフックワイヤーマーキング後に空気塞栓を発症した症例の切除肺を調査し、マーカーが亜区域気管支を貫いていることを観察したため、気管支と隣接する肺内血管の交通によって空気塞栓が生じるものと推測している⁴³⁾。

CT ガイド下マイクロコイル留置は、フックワイヤー法の代替となりうるマーキング法であり、フック

ワイヤー法と同様に、留置後にCTによって腫瘍とマーカーの位置関係を把握することができる¹⁶⁾³⁶⁾。しかし、フックワイヤーと異なり、術中にマイクロコイルの位置を視認することは困難であり、透視による位置確認が必要となる。CTガイド下マイクロコイル留置はフックワイヤー方と同様に気胸などの危険性を有するが、フックワイヤー法よりも合併症の危険性が低いとする報告もある³⁶⁾。

色素（メチレンブルー³⁷⁾、インドシアニングリーン [ICG]³⁸⁾）や造影剤（リピオドール³⁹⁾）、放射性同位物質（テクネシウム⁴⁰⁾⁴¹⁾）などの液体によるマーキングもCTガイド下に行うことができる。メチレンブルーは胸腔鏡での視認が容易で、同定には他の機材を必要としない⁴⁴⁾。対照的に、ICGでは専用の蛍光染色を検出する機材、造影剤では透視、また、放射線同位物質ではガンマプローベが同定のために必要となる。液体を用いたマーキングの一般的な問題点に、液体の胸腔内への漏出があり、腫瘍の局在確認が困難となる可能性がある。

B 気管支鏡下マーキング

様々な種類のマーカーを気管支鏡下に留置することもでき、マイクロコイル⁴⁵⁾⁴⁶⁾、色素⁴⁷⁾⁴⁸⁾、放射性同位物質⁴⁹⁾⁵⁰⁾などがある。気管支鏡により適切な部位にマーカーを留置するため、透視、CT、バーチャル気管支鏡技術などが利用されている⁴⁵⁾⁵¹⁾。術中のマーカー位置確認は、前述のCTガイド下と同様の方法を用いて行われる。CTガイド下マーキングと比較して、一般的に気管支鏡下マーキングは深部病変への到達が容易であり、肺尖部や横隔膜上などCTガイド下には安全に到達することが困難な場所においても、比較的簡単にアプローチすることができると考えられている。

VAL-MAP (virtual-assisted lung mapping) は、腫瘍の局在確認と十分な切除マージン確保のために、腫瘍を取り囲むように肺胸膜下に複数の色素によるマーキング（マッピングと呼ばれる）を行う方法である。VAL-MAPは、3DCTによるプランニング、バーチャル気管支鏡ナビゲーション下マーキング（胸膜下の色素注入に加え、腫瘍よりも深部へのマイクロコイル留置が追加される場合もある）、マーキング後のCT、術中の色素視認と透視によるマイクロコイル確認の要素で構成される⁴⁸⁾⁵²⁾。初期のVAL-MAPではマイクロコイル留置は含まれなかったが、深部断端が不十分となる可能性からVAL-MAP 2.0にて追加されている¹⁵⁾。

Table 1 Characteristics of the marking procedures

Markers	Characteristics of procedures					Complications		
	Preoperative confirmation	Intraoperative detection	Access to deep lesion	Multiple markers	Real-time monitoring*	Pneumo-thorax	Air embolism	Other complications
<i>CT-guided percutaneous approach</i>								
Hookwire	CT	Visual (string)	Difficult	No	No	Yes	Yes	Dislocation, hemorrhage
Microcoil	CT	Fluoroscopy, CBCT	Difficult	No	No	Yes	Unknown	Dislocation
Dye	N/A	Visual (dye)	Difficult	No	No	Yes	Unknown	Limited retention with diffusion, pleural spillage
Radioisotope	Nuclear scintigram	Gamma probe	Difficult	No	Yes	Yes	Unknown	Pleural spillage
<i>Bronchoscopic approach</i>								
Microcoil	CT	Fluoroscopy, CBCT	Relatively easy	No	No	Rare	No	Dislocation
Dye	N/A	Visual (dye)	Relatively easy	No	No	Rare	No	Limited retention with diffusion
VAL-MAP	CT	Visual (dye), fluoroscopy, CBCT	Relatively easy	No	No	Rare	No	Hemorrhage
RFID	CT	RFID probe, fluoroscopy, CBCT	Relatively easy	Yes	Yes	Rare	No	Dislocation

CBCT : Cone-beam computed tomography, CT : Computed tomography, ICG : Indocyanine green, N/A : Not applicable, RFID : Radiofrequency identification, VAL-MAP : Virtual-assisted mapping. *Real-time confirmation that the marker exists in the lung to be resected without using fluoroscopy when dividing the lung parenchyma.

RFID (radiofrequency identification) マーキングは肺腫瘍の局在確認のために新たに開発された方法である¹⁷⁾⁵³⁾⁻⁵⁵⁾。RFID マーキングについては後述の「信州大学における低侵襲精密肺区域切除」において説明を加える。

C マーカーを用いない術中超音波による腫瘍局在確認

肺野末梢の病変は、術中に肺が虚脱した後、フレキシブル超音波プローベによる局在確認が可能である⁵⁶⁾⁵⁷⁾。検出可能な病変は、腫瘍径で最小2 mm、胸膜からの距離で最大24 mmの深度であったと報告されている⁵⁶⁾。術中超音波は、局在確認のみではなく、画像所見に基づく腫瘍の鑑別診断に有用であるとの報告もある。超音波による腫瘍局在確認は、以下に述べるように他のマーキング法と比較して様々な長所がある。マーカー留置の必要性がなく、それに伴う合併症が生じないこと、また、肺実質の切離時にリアルタイムで腫瘍局在を確認できる点である。超音波法の短所と考えられているのは、深部病変への使用が困難な場合が多いこと、胸腔鏡下での超音波による病変描出に技術が必要であること、不完全虚脱や背景肺の影響を強く受けることなどである。

VI 信州大学における低侵襲精密肺区域切除

minimally invasive *precision lung segmentectomy*

安全・確実かつ精度の高い低侵襲肺区域切除術を行うために、信州大学では、胸腔鏡もしくはロボット支援下に、以下の2つの最新技術を採用し低侵襲精密肺区域切除を行っている。①最新の3DCT解析ソフトウェアを用いた「外科医による」区域切除プランニングと②最新のRFID技術を用いた腫瘍の局在確認である。これらの技術を併用することで、これまでに類を見ない信大式とも呼べる低侵襲精密肺区域切除を実現している。

A 外科医指向の肺区域切除プランニング・シミュレーション・ナビゲーション

前述のように術前3DCTによる解剖評価は術前シミュレーションや術中ナビゲーションにおいて有用である。しかしながら、従来の3DCT解析ソフトウェアでは次に挙げるような問題点もある。1つ目は3DCTを用いたシミュレーション画像を作成するには時間がかかり、また、外科医にとってやや難解な操作を要する点である。2つ目は造影CTを行うことができない症例では基本的に3DCTの作成が困難であること。3つ目には、外科医が区域切除術において真に必要なシミュレーション画像(例えば気管支・肺動脈切離断端

の描出、手前の気管支・血管を切離した後の深部構造物の位置・形状、区域間静脈と区域間面の形状など)を得るのが困難であることが挙げられる。これらの問題点を解決するため、Ziosoft社により3DCT解析ソフトウェアREVORASが開発され、日本で最初に信州大学(2020年8月)に導入され、実地臨床に用いられている。このソフトウェアには区域切除プランニングという機能があり、3DCTに関する特別な知識と技術を持たない外科医でも簡便に使用できる。具体的には次に挙げるような外科医指向の特徴を有する。①造影CTあるいは単純CTのどちらにも対応する3DCT自動抽出機能;②腫瘍の局在あるいは気管支・肺動脈の切離予定部位を指定することにより半自動的に行われる区域切除解析;③切離断端部位の調整、追加切除、区域間静脈の設定など、外科医が簡便に行うことができる解析調整機能;④各プランニングにおける断端距離の自動測定;⑤術前シミュレーションおよび術中ナビゲーションに有用な、実際の手術手順に対応する3D画像などである(Fig. 2)。日常臨床における長所としては、i)外科医にとって簡便なツールであること、ii)単純CTからも「ワンクリック」で3DCTを作成できること、iii)気管支あるいは肺動脈の切離断端それぞれから、独立した切除プランニングを立てることができるため、解剖の破格など様々な状況に柔軟に対応できること、iv)切離断端や区域間面など区域切除における重要な局面の3D画像化ができること、などが挙げられる。

B RFID技術を用いた術中の腫瘍局在リアルタイム・モニタリング

RFID技術を用いた気管支鏡下マーキングは、現在実臨床での使用が認められており(SuReFind, ホギメディカル)、下記の構成要素からなる¹⁷⁾⁵³⁾⁻⁵⁵⁾。A)マーカー:コイル型のアンカーが付着したマイクロRFIDタグ(ICタグ)。B)デリバリーデバイス:直径2mmのワーキングチャンネルから挿入可能。C)検出器:直径10mmの検出プローベと信号処理装置。実臨床において、RFIDマーキングは下記の4つのステップからなる。ステップ①透視あるいはCTガイド下のナビゲーション気管支鏡によるマーカー留置(腫瘍近傍のあるいは腫瘍内の末梢気管支内)、ステップ②マーカー留置後のCTによるマーカーと腫瘍の位置関係の把握、ステップ③滅菌検出プローベを用いた術中のマーカー局在確認、ステップ④確実に十分な切除マージンを得るため、マーカーの局在を確認しながら肺実質を切離するリアルタイム・モニタリング(Fig. 3)。この方法の長所は、i)72

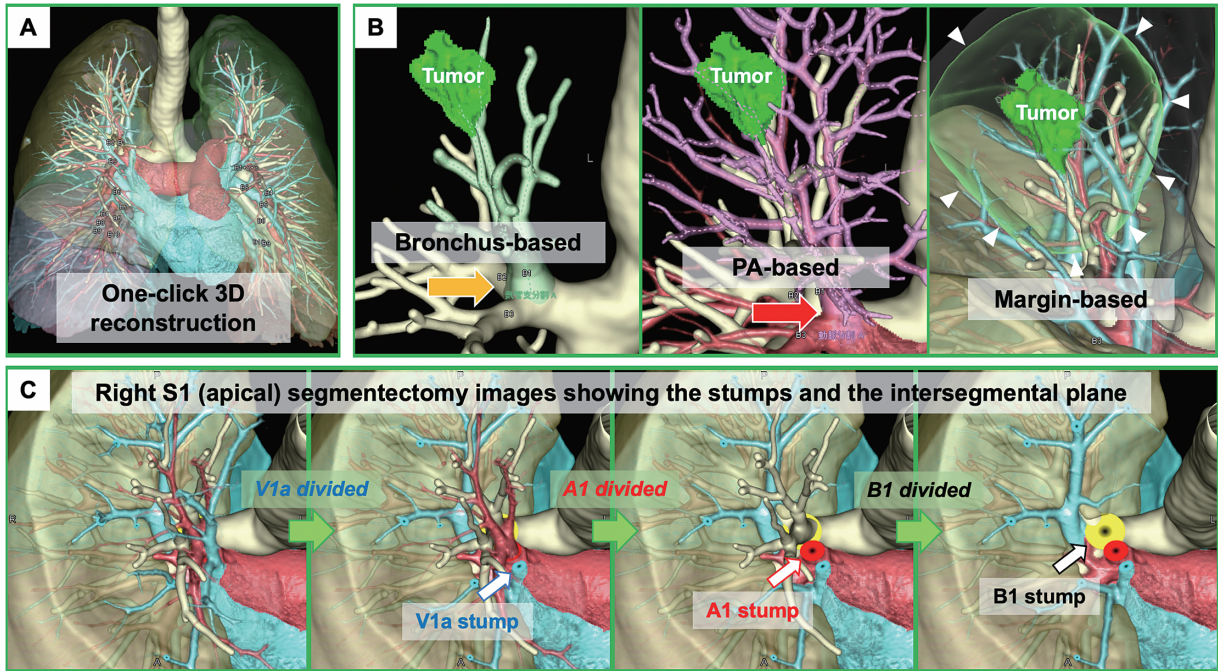


Fig. 2 区域切除プランニングにおける3DCTシミュレーション画像

- A : 3D 画像は、対象となる造影あるいは単純 CT を選択するだけの“one click”で自動作成される。
 B : 区域切除解析を行う上で、その基準要素を、切離気管支、切離肺動脈、あるいは切除マージンから選択することができる。黄色矢印は気管支切離予定線、赤矢印は肺動脈切離予定線、白の矢印は腫瘍から 2 cm の切離マージンを示す。
 C : 右 S1 区域切除のシミュレーション画像で、気管支・血管切離断端および区域間面が描出されている。実際の手術手順に即して、血管を切離した後に深部に現れる気管支の形状が確認できるなど、術前シミュレーションおよび術中ナビゲーションに有用な画像を容易に作成できる。

略語 : A, artery ; B, bronchus ; PA, pulmonary artery ; V, vein ; 3D, three dimensional.

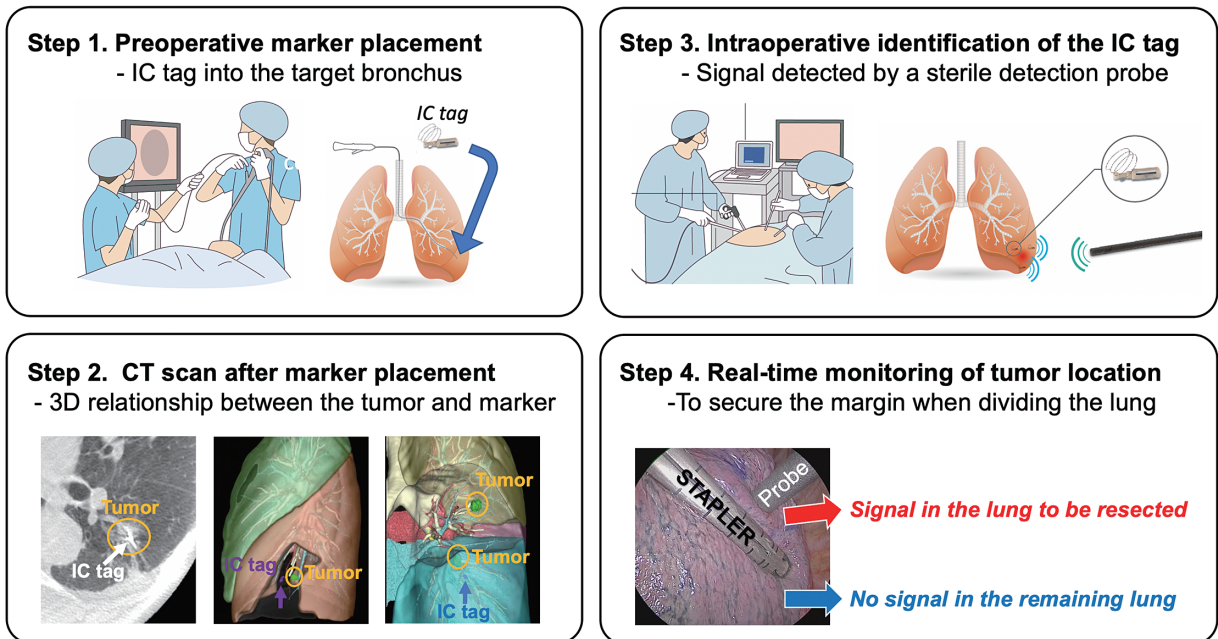


Fig. 3 RFID (radiofrequency identification) マーキングを用いた腫瘍切除

- Step 1 : 気管支鏡下にマーカー (IC タグ) を腫瘍近傍あるいは腫瘍内の気管支に留置する。
 Step 2 : マーカー留置後の CT により IC タグと腫瘍の正確な位置関係を把握できる。
 Step 3 : 検出プローブを用いて IC タグからの信号強度に基づいて腫瘍の位置を確認することができる。
 Step 4 : 確実な切除マージンを得るため、腫瘍の位置を確認しつつ肺実質切離を行う (リアルタイム・モニタリング)。

時間以内であればマーカーの術前留置が可能なこと、
 ii) それぞれのマーカーに個別の ID 情報があり、複数のマーカーを留置した場合に各々検出できること、
 iii) 肺切離時であっても簡便に局在確認が可能であること (リアルタイム・モニタリング), などが挙げられる。一方で短所として、稀ではあるが、直径 3 mm 以上の気管支に留置されたような場合にマーカー脱落の可能性、正確なマーカー留置には気管支鏡技術およびバーチャル気管支鏡ナビゲーションなどの装備に依存する可能性などが挙げられる⁵⁸⁾⁵⁹⁾。

Ⅶ 結 語

本稿では、低侵襲肺区域切除において報告されてい

るエビデンスを、特に術前シミュレーションと術中ナビゲーション、そして小型病変の局在確認に焦点を当て、総括した。この個別化癌治療の時代に、我々呼吸器外科医は、個々の患者背景・呼吸機能・腫瘍局在・解剖学的特徴に基づく安全・確実かつ精度の高い肺区域切除を提供する必要がある、そのために低侵襲肺区域切除における技術進歩に通じていなければならない。本稿がその一助となるならば幸いである。

利益相反の開示

本総説において筆者らが開示すべき利益相反はない。

文 献

- 1) Ginsberg RJ, Rubinstein LV: Randomized trial of lobectomy versus limited resection for T1 N0 non-small cell lung cancer. Lung Cancer Study Group. *Ann Thorac Surg* 60: 615-622; discussion 622-623, 1995
- 2) Shirvani SM, Jiang J, Chang JY, et al: Comparative effectiveness of 5 treatment strategies for early-stage non-small cell lung cancer in the elderly. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 84: 1060-1070, 2012
- 3) Dai C, Shen J, Ren Y, et al: Choice of Surgical Procedure for Patients With Non-Small-Cell Lung Cancer ≤ 1 cm or > 1 to 2 cm Among Lobectomy, Segmentectomy, and Wedge Resection: A Population-Based Study. *J Clin Oncol* 34: 3175-3182, 2016
- 4) Boffa DJ, Dhamija A, Kosinski AS, et al: Fewer complications result from a video-assisted approach to anatomic resection of clinical stage I lung cancer. *J Thorac Cardiovasc Surg* 148: 637-643, 2014
- 5) Bendixen M, Jørgensen OD, Kronborg C, Andersen C, Licht PB: Postoperative pain and quality of life after lobectomy via video-assisted thoracoscopic surgery or anterolateral thoracotomy for early stage lung cancer: a randomised controlled trial. *Lancet Oncol* 17: 836-844, 2016
- 6) Hristov B, Eguchi T, Bains S, et al: Minimally Invasive Lobectomy Is Associated With Lower Noncancer-specific Mortality in Elderly Patients: A Propensity Score Matched Competing Risks Analysis. *Ann Surg* 270: 1161-1169, 2019
- 7) Kumar A, Deng JZ, Raman V, et al: A National Analysis of Minimally Invasive Vs Open Segmentectomy for Stage IA Non-Small-Cell Lung Cancer. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 33: 535-544, 2021
- 8) Shimizu K, Nagashima T, Ohtaki Y, et al: Analysis of the variation pattern in right upper pulmonary veins and establishment of simplified vein models for anatomical segmentectomy. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 64: 604-611, 2016
- 9) Eguchi T, Takasuna K, Kitazawa A, et al: Three-dimensional imaging navigation during a lung segmentectomy using an iPad. *Eur J Cardiothorac Surg* 41: 893-897, 2012
- 10) Shimizu K, Nakazawa S, Nagashima T, Kuwano H, Mogi A: 3D-CT anatomy for VATS segmentectomy. *J Vis Surg* 3: 88, 2017
- 11) Nakazawa S, Hanawa R, Nagashima T, Shimizu K, Yajima T, Shirabe K: Segmentectomy Guided by 3D Images Reconstructed from Non-enhanced Computed Tomography Data. *Ann Thorac Surg* 111: e301-e304, 2020
- 12) Akiba T, Marushima H, Odaka M, Harada J, Kobayashi S, Morikawa T: Pulmonary vein analysis using three-dimensional computed tomography angiography for thoracic surgery. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 58: 331-335, 2010
- 13) Fukuhara K, Akashi A, Nakane S, Tomita E: Preoperative assessment of the pulmonary artery by three-dimensional computed tomography before video-assisted thoracic surgery lobectomy. *Eur J Cardiothorac Surg* 34: 875-877, 2008

- 14) Matsumoto T, Kanzaki M, Amiki M, et al: Comparison of three software programs for three-dimensional graphic imaging as contrasted with operative findings. *Eur J Cardiothorac Surg* 41 : 1098-1103, 2012
- 15) Sato M: Precise sublobar lung resection for small pulmonary nodules : localization and beyond. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 68 : 684-691, 2020
- 16) Powell TI, Jangra D, Clifton JC, et al: Peripheral lung nodules : fluoroscopically guided video-assisted thoracoscopic resection after computed tomography-guided localization using platinum microcoils. *Ann Surg* 240 : 481-488 ; discussion 8-9, 2004
- 17) Yutaka Y, Sato T, Matsushita K, et al: Three-dimensional Navigation for Thoracoscopic Sublobar Resection Using a Novel Wireless Marking System. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 30 : 230-237, 2018
- 18) Nakazawa S, Shimizu K, Mogi A, Kuwano H: VATS segmentectomy : past, present, and future. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 66 : 81-90, 2018
- 19) Handa Y, Tsutani Y, Mimae T, Miyata Y, Okada M: Complex segmentectomy in the treatment of stage IA non-small-cell lung cancer. *Eur J Cardiothorac Surg* 57 : 114-121, 2020
- 20) Shimizu K, Mogi A, Yajima T, et al: Thoracoscopic Subsuperior Segment Segmentectomy. *Ann Thorac Surg* 104 : e407-e410, 2017
- 21) Shimizu K, Nagashima T, Yajima T, et al: Thoracoscopic Medial-Basal Segment Segmentectomy. *Ann Thorac Surg* 104 : e403-e406, 2017
- 22) Yajima T, Shimizu K, Mogi A, Kosaka T, Nakazawa S, Shirabe K: Thoracoscopic right middle lobe segmentectomy. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 67 : 344-347, 2019
- 23) Ceppa DP, Balderson S, D'Amico TA: Technique of thoracoscopic basilar segmentectomy. *Semin Thorac Cardiovasc Surg* 23 : 64-66, 2011
- 24) Okada M, Sakamoto T, Yuki T, Mimura T, Miyoshi K, Tsubota N: Hybrid surgical approach of video-assisted minithoracotomy for lung cancer : significance of direct visualization on quality of surgery. *Chest* 128 : 2696-2701, 2005
- 25) Okada M, Mimura T, Ikegaki J, Katoh H, Itoh H, Tsubota N: A novel video-assisted anatomic segmentectomy technique : selective segmental inflation via bronchofiberoptic jet followed by cautery cutting. *J Thorac Cardiovasc Surg* 133 : 753-758, 2007
- 26) Endoh M, Oizumi H, Kato H, et al: Posterior approach to thoracoscopic pulmonary segmentectomy of the dorsal basal segment : A single-institute retrospective review. *J Thorac Cardiovasc Surg* 154 : 1432-1439, 2017
- 27) Pardolesi A, Park B, Petrella F, Borri A, Gasparri R, Veronesi G: Robotic anatomic segmentectomy of the lung : technical aspects and initial results. *Ann Thorac Surg* 94 : 929-934, 2012
- 28) Veronesi G, Novellis P, Voulaz E, Alloisio M: Robot-assisted surgery for lung cancer : State of the art and perspectives. *Lung Cancer* 101 : 128-134, 2016
- 29) Perroni G, Veronesi G: Robotic segmentectomy : indication and technique. *J Thorac Dis* 12 : 3404-3410, 2020
- 30) Boyden EA: Analysis of variations of the bronchopulmonary segments in the left upper lobes of fifty lungs. *Anat Rec* 94 : 450, 1946
- 31) Nagashima T, Shimizu K, Ohtaki Y, et al: An analysis of variations in the bronchovascular pattern of the right upper lobe using three-dimensional CT angiography and bronchography. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 63 : 354-360, 2015
- 32) Nagashima T, Shimizu K, Ohtaki Y, et al: Analysis of variation in bronchovascular pattern of the right middle and lower lobes of the lung using three-dimensional CT angiography and bronchography. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 65 : 343-349, 2017
- 33) Nakazawa S, Shimizu K, Kawatani N, et al: Right upper lobe segmentectomy guided by simplified anatomic models. *JTCVS Tech* 4 : 288-297, 2020
- 34) Suzuki K, Shimohira M, Hashizume T, et al: Usefulness of CT-guided hookwire marking before video-assisted

- thoracoscopic surgery for small pulmonary lesions. *J Med Imaging Radiat Oncol* 58: 657-662, 2014
- 35) Mack MJ, Gordon MJ, Postma TW, et al: Percutaneous localization of pulmonary nodules for thoracoscopic lung resection. *Ann Thorac Surg* 53: 1123-1124, 1992
 - 36) Hajjar W, Al-Nassar S, Almousa O, et al: Thoracoscopic resection of suspected metastatic pulmonary nodules after microcoil localization technique: a prospective study. *J Cardiovasc Surg (Torino)* 58: 606-612, 2017
 - 37) Kerrigan DC, Spence PA, Crittenden MD, Tripp MD: Methylene blue guidance for simplified resection of a lung lesion. *Ann Thorac Surg* 53: 163-164, 1992
 - 38) Hachey KJ, Digesu CS, Armstrong KW, et al: A novel technique for tumor localization and targeted lymphatic mapping in early-stage lung cancer. *J Thorac Cardiovasc Surg* 154: 1110-1118, 2017
 - 39) Nomori H, Horio H, Naruke T, Suemasu K: Fluoroscopy-assisted thoracoscopic resection of lung nodules marked with lipiodol. *Ann Thorac Surg* 74: 170-173, 2002
 - 40) Manca G, Davini F, Tardelli E, et al: Clinical Impact of Radioguided Localization in the Treatment of Solitary Pulmonary Nodule: A 20-Year Retrospective Analysis. *Clin Nucl Med* 43: 317-322, 2018
 - 41) Sugi K, Kaneda Y, Hirasawa K, Kunitani N: Radioisotope marking under CT guidance and localization using a handheld gamma probe for small or indistinct pulmonary lesions. *Chest* 124: 155-158, 2003
 - 42) Iguchi T, Hiraki T, Matsui Y, et al: Preoperative short hookwire placement for small pulmonary lesions: evaluation of technical success and risk factors for initial placement failure. *Eur Radiol* 28: 2194-2202, 2018
 - 43) Horan TA, Pinheiro PM, Araújo LM, Santiago FF, Rodrigues MR: Massive gas embolism during pulmonary nodule hook wire localization. *Ann Thorac Surg* 73: 1647-1649, 2002
 - 44) Thistlethwaite PA, Gower JR, Hernandez M, Zhang Y, Picel AC, Roberts AC: Needle localization of small pulmonary nodules: Lessons learned. *J Thorac Cardiovasc Surg* 155: 2140-2147, 2018
 - 45) Miyoshi T, Kondo K, Takizawa H, et al: Fluoroscopy-assisted thoracoscopic resection of pulmonary nodules after computed tomography--guided bronchoscopic metallic coil marking. *J Thorac Cardiovasc Surg* 131: 704-710, 2006
 - 46) Toba H, Kondo K, Miyoshi T, et al: Fluoroscopy-assisted thoracoscopic resection after computed tomography-guided bronchoscopic metallic coil marking for small peripheral pulmonary lesions. *Eur J Cardiothorac Surg* 44: e126-e132, 2013
 - 47) Sakamoto T, Takada Y, Endoh M, Matsuoka H, Tsubota N: Bronchoscopic dye injection for localization of small pulmonary nodules in thoracoscopic surgery. *Ann Thorac Surg* 72: 296-297, 2001
 - 48) Sato M, Omasa M, Chen F, et al: Use of virtual assisted lung mapping (VAL-MAP), a bronchoscopic multispot dye-marking technique using virtual images, for precise navigation of thoracoscopic sublobar lung resection. *J Thorac Cardiovasc Surg* 147: 1813-1819, 2014
 - 49) Okumura T, Kondo H, Suzuki K, et al: Fluoroscopy-assisted thoracoscopic surgery after computed tomography-guided bronchoscopic barium marking. *Ann Thorac Surg* 71: 439-442, 2001
 - 50) Asano F, Shindoh J, Shigemitsu K, et al: Ultrathin bronchoscopic barium marking with virtual bronchoscopic navigation for fluoroscopy-assisted thoracoscopic surgery. *Chest* 126: 1687-1693, 2004
 - 51) Endo M, Kotani Y, Satouchi M, et al: CT fluoroscopy-guided bronchoscopic dye marking for resection of small peripheral pulmonary nodules. *Chest* 125: 1747-1752, 2004
 - 52) Sato M, Nagayama K, Kobayashi M, Nakajima J: Virtual-Assisted Lung Mapping 2.0: Preoperative Bronchoscopic Three-Dimensional Lung Mapping. *Ann Thorac Surg* 108: 269-273, 2019
 - 53) Yutaka Y, Sato T, Zhang J, et al: Localizing small lung lesions in video-assisted thoracoscopic surgery via radio-frequency identification marking. *Surg Endosc* 31: 3353-3362, 2017
 - 54) Kojima F, Sato T, Takahata H, et al: A novel surgical marking system for small peripheral lung nodules based on radio frequency identification technology: Feasibility study in a canine model. *J Thorac Cardiovasc Surg* 147: 1384-1389, 2014

- 55) Kojima F, Sato T, Tsunoda S, et al: Development of a novel marking system for laparoscopic gastrectomy using endoclips with radio frequency identification tags: feasibility study in a canine model. *Surg Endosc* 28: 2752-2759, 2014
- 56) Khereba M, Ferraro P, Duranceau A, et al: Thoracoscopic localization of intraparenchymal pulmonary nodules using direct intracavitary thoracoscopic ultrasonography prevents conversion of VATS procedures to thoracotomy in selected patients. *J Thorac Cardiovasc Surg* 144: 1160-1165, 2012
- 57) Kondo R, Yoshida K, Hamanaka K, et al: Intraoperative ultrasonographic localization of pulmonary ground-glass opacities. *J Thorac Cardiovasc Surg* 138: 837-842, 2009
- 58) Kato A, Yasuo M, Tokoro Y, et al: Virtual bronchoscopic navigation as an aid to CT-guided transbronchial biopsy improves the diagnostic yield for small peripheral pulmonary lesions. *Respirology* 23: 1049-1054, 2018
- 59) Sato T, Yutaka Y, Ueda Y, et al: Diagnostic yield of electromagnetic navigational bronchoscopy: results of initial 35 cases in a Japanese institute. *J Thorac Dis* 10: S1615-S1619, 2018

(R 3. 4. 23 受稿)
