



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	3D-CTを用いた肺区域解剖の研究
Author(s)	椎名, 伸行
Description	配架番号 : 2383
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第13004号
Issue Date	2018-03-22
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13004
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70286
Type	doctoral thesis
File Information	Nobuyuki_Shiina.pdf



学 位 論 文

3D-CT を用いた肺区域解剖の研究

(Pulmonary vessels anatomy analysis using three – dimensional
reconstructed computed tomography (3D-CT))

2018 年 3 月

北 海 道 大 学

椎名 伸行

目 次

【発表論文目録および学会発表目録】	1
【緒言】	2
【略語表】	6
【第一章】 3D-CT による呼吸器外科手術前シミュレーションの 精度と限界点の検討	
〈緒言〉	7
〈研究方法〉	7
〈研究結果〉	8
〈考察〉	12
【第二章】 読影能のラーニングカーブについての検討	
〈緒言〉	14
〈研究方法〉	14
〈研究結果〉	14
〈考察〉	15
【第三章】 肺血管の区域解剖の分類	
〈緒言〉	18
〈研究方法〉	22
〈研究結果 1〉	23
〈研究結果 2〉	28
〈考察〉	31
【考察】	35
【総括および結論】	38
【謝辞】	39
【引用文献】	40

【発表論文目録および学会発表目録】

本研究の結果の一部は以下の論文に掲載予定である.

1. Variations of pulmonary vein drainage critical for lung resection assessed by three-dimensional CT angiography.
Nobuyuki Shiina, Kichizo Kaga, Yasuhiro Hida, Tsukasa Sasaki, Satoshi Hirano and Yoshiro Matsui.
Thoracic Cancer (2018 年 2 月 6 日受理)

本研究の一部は以下の学会に発表した。

1. Nobuyuki Shiina, Kichizo Kaga, Yasuhiro Hida, Kenjiro Misu, Satoshi Hirano, Satoshi Kondo : Simulation Surgery by 3DCT for Video-Assisted Thoracoscopic Surgery, 9th Asia Pacific Congress of Endoscopic Surgery NOV.4-6, 2009 China
2. 椎名伸行, 加賀基知三, 樋田泰浩, 三栖賢二郎、武藤潤, 室田千晶, 平野聡, 近藤哲 : 呼吸器外科手術における 3D-CT を用いた手術 simulation の精度に関する検討, 第 110 回日本呼吸外科学会定期学術集会・口演 2010 年 4 月 9 日 名古屋
3. 椎名伸行, 加賀基知三, 樋田泰浩, 飯村泰昭, 大高和人, 武藤潤, 中田玲子, 平野聡, 近藤哲 : 三次元再構築 CT 画像 (3D-CT) による肺動静脈分枝様式の検討, 第 111 回日本呼吸外科学会定期学術集会 紙上開催
4. 椎名伸行, 加賀基知三, 樋田泰浩, 三栖賢二郎, 我孫子剛大, 大高和人, 平野聡, 近藤哲 : 呼吸器外科手術における 3D-CT を用いた手術 simulation の精度に関する検討, 第 71 回日本臨床外科学会総会・ワークショップ 2011 年 11 月 2 日 京都
5. 椎名伸行, 加賀基知三, 大高和人, 武藤潤, 飯村泰昭, 樋田泰浩, 平野聡, 近藤哲 : 外科におけるバーチャル画像の有用性と限界 呼吸器外科領域における術前三次元再構築 CT (3D-CT) の有用性と限界の検討, 第 72 回日本臨床外科学会総会・ワークショップ 2012 年 3 月 24 日 横浜

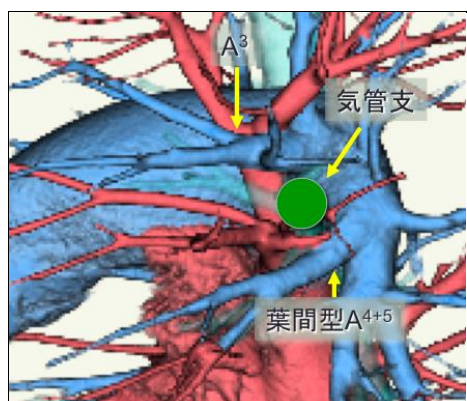
【緒言】

原発性肺癌に対する標準術式は、リンパ節郭清を伴う肺葉切除であるが、近年、原発性肺癌に対する縮小手術、特に肺実質外套領域に存在し腫瘍径が2cm以下の腫瘍であり、かつ薄切CTで浸潤影/腫瘍比が25%以下の腫瘍に対する積極的縮小手術（肺切除範囲の縮小）^{1,2}や、多発肺癌、再発癌、転移性肺腫瘍に対して可及的肺機能温存を目的とした、難易度の高い肺区域切除が増加する傾向にある。また、胸腔鏡による低侵襲手術が確立されて増加している³。胸腔鏡下肺区域切除ではより複雑な肺区域解剖を把握することを要し、三次元構造を把握することが難しく、体腔内に直接手を挿入することが不可能な胸腔鏡手術では触覚に頼ることなく、二次元的視覚より三次元構造を把握することが求められる。このような状況下で手術の安全性を確保するためには、より詳細で正確な解剖情報、特に肺血管の解剖学的知識の熟知が必要とされる。

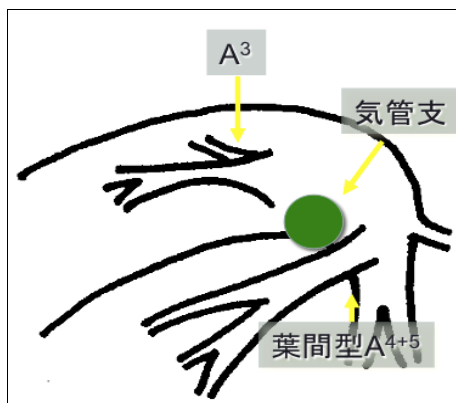
肺の区域解剖に関する研究は、海外においては1945年頃にJacson-Huber,⁴ Boyden⁵らによる研究により明らかにされ広められた。日本においては1951年に山下により区域解剖が研究された。その方法は解剖前の屍にホルマリン水を注入した肺を前顎面、矢状面または水平面で0.5cm位の厚さに切断し、各切片をガラスに写し取ったものを正確に重ね合わせて検討するものであった⁶。また、これらの研究は、結核研究所および監察医務院における約100例の献体解剖の集計に基づいてなされたもので、生体情報に基づいたものではない。その後塩沢、荒井ら⁷によって多少の変更がなされたがその精度については検証されることなく現在に至っている。

呼吸器外科手術において術前に個別に肺動脈の分岐情報を得ることは非常に重要である。例えば、左上葉に分岐する肺動脈は上区への区域枝である上区動脈と、舌区への区域枝である舌区動脈が存在する。舌区動脈は典型例では葉間面から1本ないし2本分岐しているが（葉間型）、破格として縦隔面から下降する縦隔型舌区動脈の存在が知られている。世界中で使用されているYamashitaの分類ではこの縦隔型舌区動脈の存在は30.0%と報告している⁸。この縦隔型舌区動脈の存在の有無は上区域切除の際に重要な情報となる。上区域切除の際にはこの縦隔型舌区動脈は温存しなければならない血管であるが、縦隔型舌区動脈は上区動脈の区域枝であるAnterior artery(A³)の近傍から分岐しているため、誤認する可能性がある。また、縦隔型舌区動脈と上区域気管支の位置関係も重要である。縦隔型舌区動脈は葉間型とは異なり上区域気管支のすぐ腹側に位置する。そのため気管支切離の際には縦隔型舌区動脈の損傷に細心の注意を必要とする。図1に3D-CT、シェーマおよ

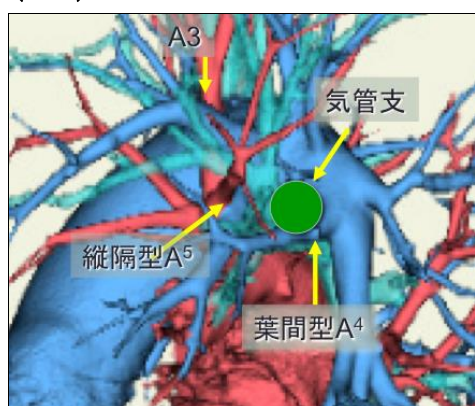
び実際の手術写真を示す.



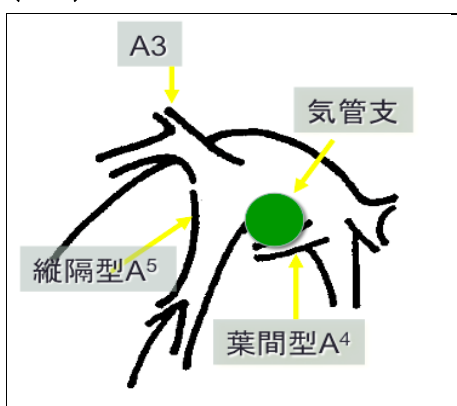
(a-1)



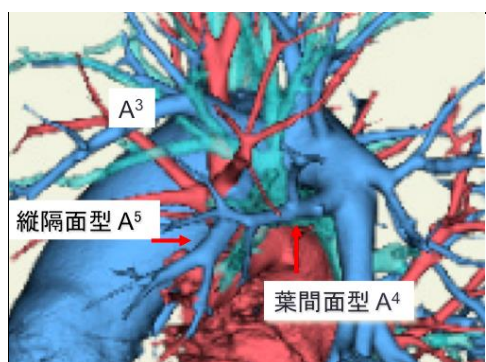
(a-2)



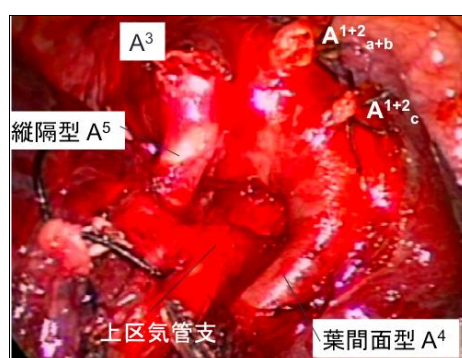
(b-1)



(b-2)



(c-1)



(c-2)

図 1. (a) 葉間型舌区動脈（典型例）と気管支の位置関係についての 3D-CT 画像 (a-1) と, シェーマ (a-2). (b) 縦隔型舌区動脈と気管支の位置関係についての 3D-CT 画像 (b-1) とシェーマ (b-2). (c) 縦隔型舌区動脈のバリエーションを有する 3D-CT 画像 (c-1) と術中写真 (c-2). 上区域切除後, 温存すべき縦隔型舌区枝は A^3 直近から分岐し上区域気管支のすぐ腹側に位置する.

CT, MRI などの画像診断機器の進歩に伴い, 脳神経外科⁹ 領域などにおいて Single-detector-row spiral CT (SDCT) での 3D-CT 再構築の報告が散見される. 胸部外科領域では Shiraishi らは, SDCT を用いた 3D-CT 再構築により乳児総肺静脈還流異常症の術前後で, 狭窄部位と肺動脈, 動脈管, 気管支の空間的関係を把握することが可能であったと報告をしている. 一方で, SDCT の問題点として約 20 秒の息止めが必要であり, 乳幼児では挿管管理下に筋弛緩薬の使用が必要であったこと, 3D-CT 再構築のために専門の放射線技師でも約 60 分を要することが挙げられた¹⁰. その後, Multidetector-row CT (MDCT) の登場により撮像時間が短縮し, 空間・時間的分解能も飛躍的に向上し, 任意断面を作成する MPR (multi planar reformation) 画像が容易に作成できるようになった. Raptopoulos らは肺動脈血栓の診断に SDCT と MDCT とを比較した検討を行った. その結果, 中間から末梢肺動脈において MDCT によって有意に高い区域枝分枝の診断を得ることができた¹¹. また, Watanabe らは SDCT は息止め時間が長い上に, 3D-CT 再構築に時間を要するために標準検査としては難しいが, MDCT では息止め時間が 15 秒に短縮され, 3D-CT 画像を 10 分以内に作成可能であることを示し, その実用性を報告している¹².

泌尿器科領域において Wunderlic らは腎部分切除術における 3D-CT による術前シミュレーションについて報告した. 腎腫瘍の位置, 個数, 大きさ, 血管解剖について検討し, 血管解剖に関して腎動脈は 43 本中 42 本描出でき (描出できなかった 1 本は accessory artery), 腎静脈は重要血管全て描出されたことを報告している¹³. 消化器外科領域では Lee らは腹腔鏡下胃癌手術において, 手術前に 3D-CT を用いることにより, 手術の精度が向上し, 危険部位の回避に有用であることを報告している¹⁴.

呼吸器外科領域においても 3D-CT 画像は任意の角度から脈管や病変の観察を可能とし, さらに肺区域血管の構造を個別に把握することができるため, 手術前のシミュレーションや手術中のナビゲーションに使用することで, 手術の精度や, 安全性の向上に貢献すると予想される. Watanabe らは, 3D-CT による術前の肺動脈の情報が出血のリスクを減らし, 術者のストレス軽減にも有効であると結論づけている¹². また, 田中らは肺癌手術における肺動脈 3D-CT は肺動脈分枝の形態把握に有用であると報告している¹⁵. Akiba らは, 解剖学的肺手術における術前 3D-CT の有用性の評価を目的とした研究で, 特に胸腔鏡手術において安全性の向上に貢献するとしている¹⁶.

このように, 呼吸器外科領域における 3D-CT による肺血管の分岐形式の分析は実臨床において胸腔鏡手術の安全性や精度の向上に貢献するものと考え

られている．しかし，3D-CT がどの程度正確に生体内の情報を反映しているかは不明であり，また，その有効性について明らかにした報告はない．

本研究では，3D-CT における肺血管（区域枝，亜区域枝）の描出能を明確にするために，描出可能な血管径の限界値を明らかにし（第 1 章），3D-CT で描出された肺動静脈（区域枝，亜区域枝）の有効な読影方法について検討した（第 2 章）．次に安全な呼吸器外科手術を施行する上で注意を要するキーとなる血管分岐形式を新たに分類して集計した（第 3 章）．

本研究は北海道大学病院の臨床研究倫理審査によって承認されている．
臨床研究番号及び研究課題を下記に示す．

臨床研究番号：010-0244

三次元再構築 CT（3D-CT）を用いた肺血管解剖の検討

【略語表】

本文中および図表中で使用した略語は以下の通りである

ADCT	area detector computed tomography
CT	computed tomography
DVD	digital video disc
IPV	inferior pulmonary vein
LV	left ventricle
MDCT	multidetector-row computed tomography
MPR	multi planar reformation
PA	pulmonary artery
SDCT	single-detector-row spiral computed tomography
SPV	superior pulmonary vein
3D-CT	three-dimensional reconstructed computed tomography

【第一章】3D-CT による呼吸器外科手術前シミュレーションの精度と限界点の検討

＜緒言＞

3D-CT は消化器領域¹⁴をはじめ各分野^{9, 10, 13}で応用されている．呼吸器外科領域においても，その有用性が示唆されているが，生体内の解剖を正確に反映しているのか，正しく読影できているのかについては検証されていない．本章では 3D-CT 画像を用いての肺血管（区域枝，亜区域枝）の描出能を明らかにするために，描出できる血管径の限界値を明らかにする．

＜研究方法＞

2007 年 2 月から 2009 年 2 月までの期間で肺区域切除または肺葉切除を施行した 131 症例中，術前 3D-CT を施行した 72 症例の中で最も症例数の多い右上葉切除症例 23 症例を対象とし，肺動脈区域枝と亜区域枝について，術前 3D-CT 再構築画像と実際の手術所見を比較して検証した．肺動脈の分類は図 2 に示す荒井らの分類に従った¹⁷．肺動脈には区域に流入する区域枝と，さらに一次分岐した亜区域に流入する亜区域枝が存在する．肺葉切除術では通常亜区域枝まで確認しておくことが重要であるため，本研究では亜区域枝までを読影することとした．読影は卒業後 6 年目の外科専門医 1 名で行った．3D-CT で描出されている肺動脈（区域枝，亜区域枝）をあらかじめ術前に読影し，術中所見と照合した．その結果を①3D-CT で描出されているかどうか，すなわち「3D-CT の血管描出能」，②3D-CT では描出されていないが，実際の手術所見では存在していること，すなわち「3D-CT の血管描出限界値」，③描出されている血管の区域・亜区域枝正しくが読影できているかどうか，すなわち「3D-CT 読影者の読影能」に分けて評価した．

CT 機器は 64 列 MDCT（東芝：Aquilion 64 rows）を用い，機械式インジェクター（根本杏林堂，Dual shot GX）を使用して経静脈造影（400mg I/kg）を施行した．造影剤は上腕静脈より 13 秒間同圧で注入し，その後生理食塩水を 12 秒間注入した．放射線技師により 3D DICOM データをボリュームレンダリング法により肺動静脈，気管支，腫瘍を 4 色で表示した．CT 撮像は以下のパラメーター，X 線管回転速度 0.35 秒/回転，ヘリカルピッチ 45，管電圧 120kV，管電流 300mA，で行い，再構築はワークステーション Zio（Zio Software）を使用して，スライス厚 0.5mm，再構築間隔 0.3mm で行った．撮影は深吸気位で息止めを行い，肺動脈と肺静脈のそれぞれの血管の CT 値を高く保つため 2 回の撮影を行った．3D-CT の再構築には 1 例につき 20 分程度要した．

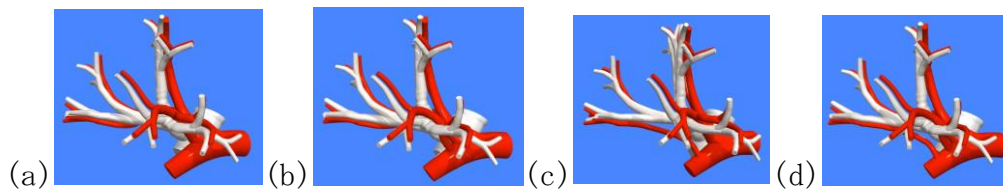


図 2. 右上葉肺動脈の破格

右上葉へ流入する動脈には肺門上前部から入る上幹動脈，下幹動脈，さらに葉間から上行する上行動脈が存在し，(a)上幹動脈型，(b)上幹・下幹動脈型(c)上幹・上行動脈型(d)上幹・下幹・上行動脈型の 4 型に分類される．上幹動脈は常に存在するが，下幹動脈，上行動脈はときに欠如する．

＜研究結果＞

右上葉肺動脈の区域枝，亜区域枝について 3D-CT で描出されているかどうかを「3D-CT の血管描出能」と定義し，実際の手術所見と比較した．症例数での結果を表 1 に示す．23 症例中，区域枝は全ての症例(23 症例)で描出されていた．亜区域枝は 23 症例中，3 症例で描出されていなかった．「3D-CT の血管描出能（症例数での結果）」は区域枝で 100% (23/23)，亜区域枝で 87.0%(20/23)であった．

表 1. 3D-CT の血管描出能(症例数での結果)

	症例数 (n=23)	血管描出能 (%)
区域枝	23 例 (23/23)	100
亜区域枝	20 例 (20/23)	87.0

次に，3D-CT の血管描出能を 23 症例中の区域枝，亜区域枝の総本数で何本描出されているかを検討したところ（本数での検討），亜区域枝までの肺動脈の描出は総本数 57 本中 54 本 3D-CT で描出されており，「3D-CT の血管描出能（総本数）」は 94.7%(54/57)であった（表 2）．

表 2. 3D-CT の血管描出能 (亜区域枝までの総本数での結果)

症例数	3D-CT 所見	手術所見	血管描出能 (%)
23 例	54 本	57 本	94.7

前述結果から 57 本中 3 本で 3D-CT で血管が描出されていないことが判明した。そこで術中所見から各症例の最も細い血管について薄切 CT からその血管径を測定した。最も細い血管が 3D-CT で描出されていた「描出群」(群 1) と描出されていなかった「非描出群」(群 2) について比較検討したところ、「3D-CT の血管描出限界値」は 2.06mm であった (図 3)。

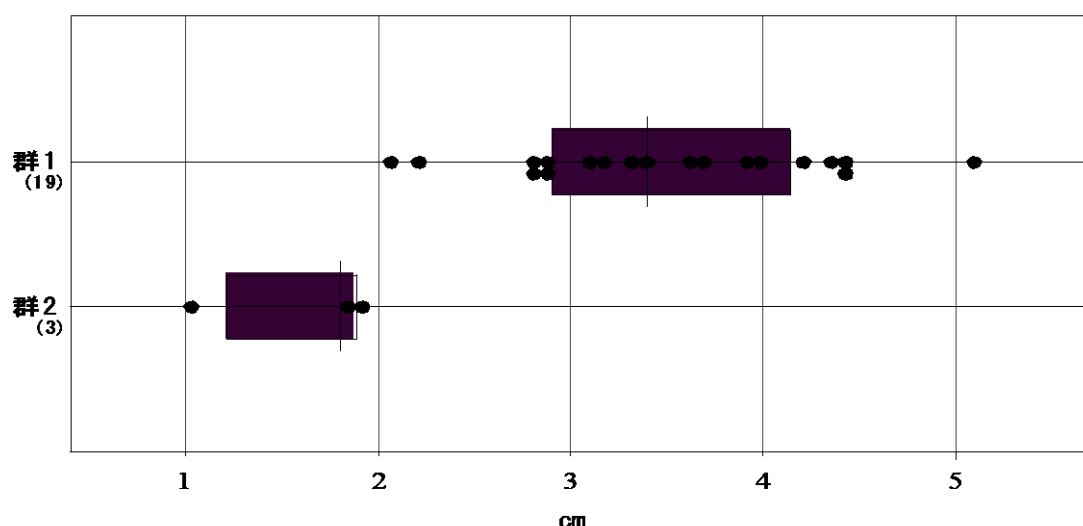


図 3. 3D-CT の血管描出限界値の検討

各症例 (全 23 症例) における最も細い血管径について薄切 CT を用いて計測。群 1 ; 3D-CT に描出された「描出群」(n=19), 群 2 ; 3D-CT に描出されていない「非描出群」(n=3)。3D-CT の血管描出限界値は 2.06mm であった。

3D-CT に描出されなかった症例の 3D-CT 画像と実際の手術所見 (術中写真) を図 4 に示す。術前 3D-CT では右上葉肺動脈は、上幹・上行動脈型 (計 2 本) と読影していた。しかし、術中所見では術前 3D-CT で描出されていた上行動脈 (橙矢印) のすぐ近傍からもう 1 本上行動脈が分岐していた (黄矢印)。術後再度 3D-CT を確認したが、やはり 3D-CT には描出されていなかった。薄

切 CT 画像で確認するとその血管径は 1.9mm であった.

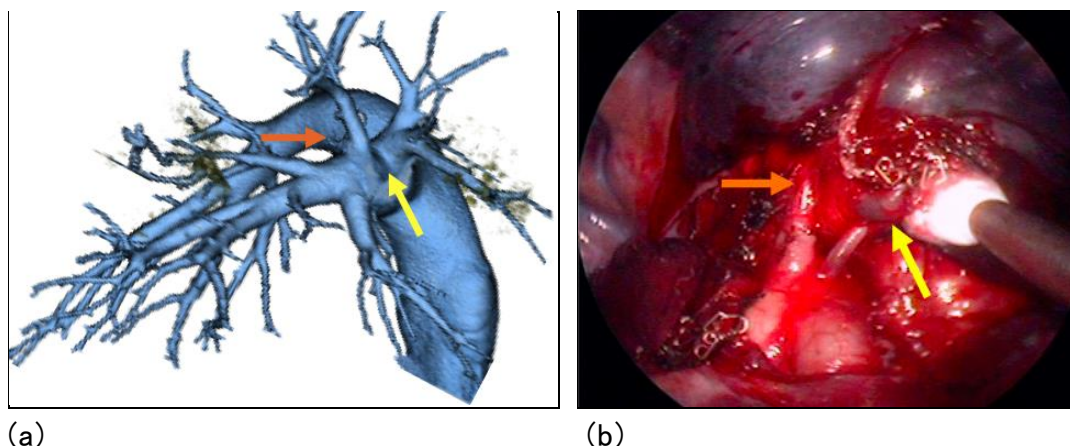


図 4. 術前 3D-CT で描出されなかった症例.

(a). 術前 3D-CT. 上幹・上行型 (計 2 本). (b). 術中写真. 葉間 (上下葉間) で上行動脈を露出.

術前 3D-CT では上行動脈が 1 本であったが (橙矢印), 実際の手術所見では 2 本の上行動脈が存在しており, 1 本描出されていなかった (黄矢印).

次に, 描出されている肺動脈の破格が正しく読影できているかどうか, すなわち「3D-CT 読影者の読影能」について検討した. 右上葉肺動脈の破格について読影結果と手術所見を照合した結果を表 3 に示す. 術前 3D-CT では上幹・上行動脈型は 13 例と読影したが, 実際の術中所見では 18 例, また, 上幹・下幹・上行動脈型は術前 3D-CT で 8 例と読影したが, 術中所見では 3 例であった. 5 例において上行動脈を下幹動脈と誤って読影していた.

表 3. 右上葉肺動脈破格の 3D-CT 読影と術中所見の比較

	読影所見 (例)	術中所見 (例)
I. 上幹動脈型	1	1
II. 上幹・下幹動脈型	1	1
III. 上幹・上行動脈型	13	18
IV. 上幹・下幹・上行動脈型	8	3
	23	23

上行動脈の有無, その本数は区域切除・肺葉切除において重要な情報となる. 特に葉間・区域間を横断して存在する肺動脈は損傷のリスクがある. 具体的には, 図 5 に示すように, 術前 3D-CT で下葉枝である Apical artery (A⁶)

と共通幹をもつ上行動脈が描出されていたが、正しく読影できていなかった。術前 3D-CT では A⁶ の分枝と読影していた（黄矢印）が、実際には根部では A⁶ と共通幹を成しており、末梢は葉間を横断して上葉へ流入する上行動脈であった。

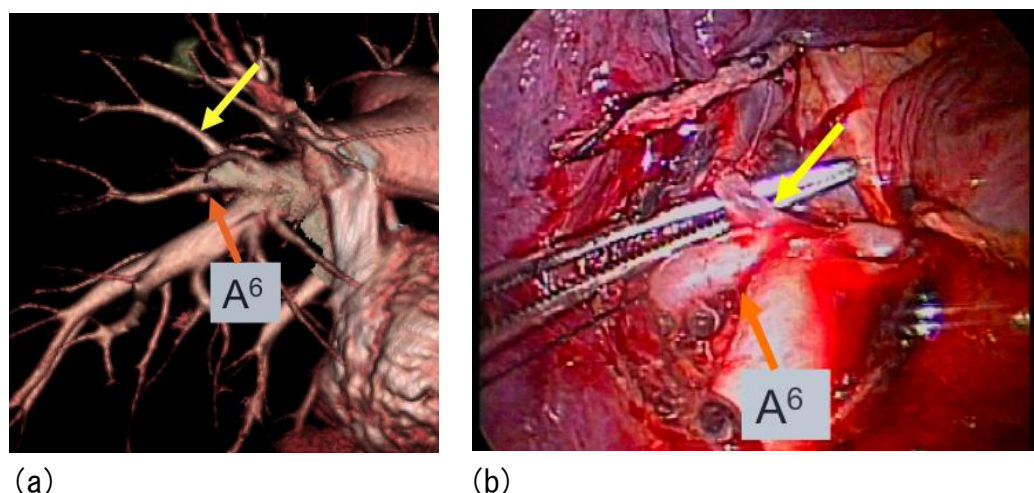


図 5. 術前 3D-CT で描出されなかった症例。

(a). 術前 3D-CT. (b). 術中所見（術中写真）。

A⁶ の分枝と読影していた血管（黄矢印）は、葉間を横断して上葉へと流入する上行動脈であった。

このように画像の描出能だけでなく、読影能にも検討の必要があることが判明した。「3D-CT 読影者の読影能」の評価として右上葉肺動脈区域枝，亜区域枝を読影し術中所見と照合した結果，読影所見と術中所見が一致した区域枝は 18 症例(18/23)，78.3%，亜区域枝では 14 症例(14/23)，60.9%であった（表 4）。症例で全ての区域枝，亜区域枝における術前読影結果と手術所見が一致したものを完全一致症例と定義すると，完全一致症例は 11 症例(11/23)，47.8%であった。

表 4. 術前 3D-CT 読影と術中所見との照合結果

	症例数 (n=23)	(%)
区域枝	18 例 (18/23)	78.3
亜区域枝	14 例 (14/23)	60.9

＜考察＞

本研究では 3D-CT による血管描出能は総本数でみた場合には、94.7%であった。また、血管描出限界値は 2.06mm であった。呼吸器外科領域における 3D-CT の血管描出能について Watanabe らは 14 症例の検討で肺動脈 86 本中 84 本 (97.7%) が 3D-CT で描出されていたと報告しており、描出されなかった 2 本の血管は 1.5mm 以下であったとしている¹²。また田中らは 11 症例の検討で、肺動脈の同定率（3D-CT での分枝同定数/手術時の分枝同定数）として、98.5%と報告している。また、同定不可能であった分枝は約 1.5mm としている¹⁵。Akiba らは 27 症例の検討で、描出できた最も細い肺動脈で 2.0mm とし、肺葉切除または肺区域切除時に切離する肺動脈のうち 27 症例中 25 症例で (92.6%)、総本数では 65 本中 62 本 (95.4%) で描出されていたと報告している。描出されなかった症例はいずれもリンパ節転移があった症例であり、うち 1 症例はリンパ節腫大がないにもかかわらず描出されていなかったことから血管の太さよりも血流や変形が関与していると考察されている¹⁶。本研究では肺腫瘍やリンパ節などによって 3D-CT による肺血管の描出に影響が出ている症例は除外したため、実際には描出能がより低いことが予想される。Fukuhara らの報告では 49 症例の検討で肺動脈の 146 本中 139 本 (95.2%) 描出されていたと報告しており、描出されていなかった血管は 2mm 以下の血管としている¹⁸。以上より本研究における 3D-CT の再構築方法、描出能、描出限界値はこれまでの報告に遜色なく、細い血管径やリンパ節などの影響を考慮すれば、術前シミュレーションのモダリティとして応用可能と考えられた。

また、右上葉肺動脈の破格の頻度について Yamashita の報告⁸と比較したところ、その頻度はほぼ同程度であった（表 5）。

表 5. 右上葉肺動脈破格の頻度の比較

	本研究 (%)	Yamashita ⁸ (%)
I. 上幹動脈型	1 (4)	(6)
II. 上幹・下幹動脈型	1 (4)	(3)
III. 上幹・上行動脈型	18 (79)	(78)
IV. 上幹・下幹・上行動脈型	3 (13)	(13)

撮影条件の差による描出能への影響についての報告がある。本研究では深吸気位での息止めをした状態で撮影したが、その撮影条件は必ずしも一定で

はない．Shikata らは吸気量の違いで肺野病変の評価には影響を与えるが，肺血管描出に変化はないと報告している¹⁹．

「3D-CT 読影者の読影能」の評価において，完全一致症例は 11 症例 (11/23)，47.8%であった．区域枝と亜区域枝で比較すると，より細かい亜区域枝の血管識別により誤認が多かった．また，共通幹の存在も原因の一つである．読影方法に関して検討された論文はない．読影方法の改善のため，上級医 (K. K.，呼吸器外科専門医) の読影方法を参考にしたところ，その読影に使用する画像に相違を認めた．3D-CT は肺動脈，肺静脈，気管・気管支をそれぞれ別々に描出した画像と全てが組み合わされた画像が存在する．著者が肺動脈のみが描出された画像を参照していたのに対し，上級医は全て描出されている画像を用いて読影していた．3D-CT は立体構造の認識に優れているが，その方向性を把握するためには気管支と肺動脈の相対的な位置関係が重要であることが判明した．緒言で述べた左上葉肺動脈における縦隔型舌区枝を例にすると，肺動脈のみの描出した画像では A³ との判別が困難であるが，それを気管支と共に描出されている画像で肺血管の方向性をより正確に読影することが可能であった (図 6)．また，読影方法だけではなく，共通幹の存在や破格の知識も読影能に影響すると思われた．このことから，読影にはラーニングカーブが存在することが予測された．

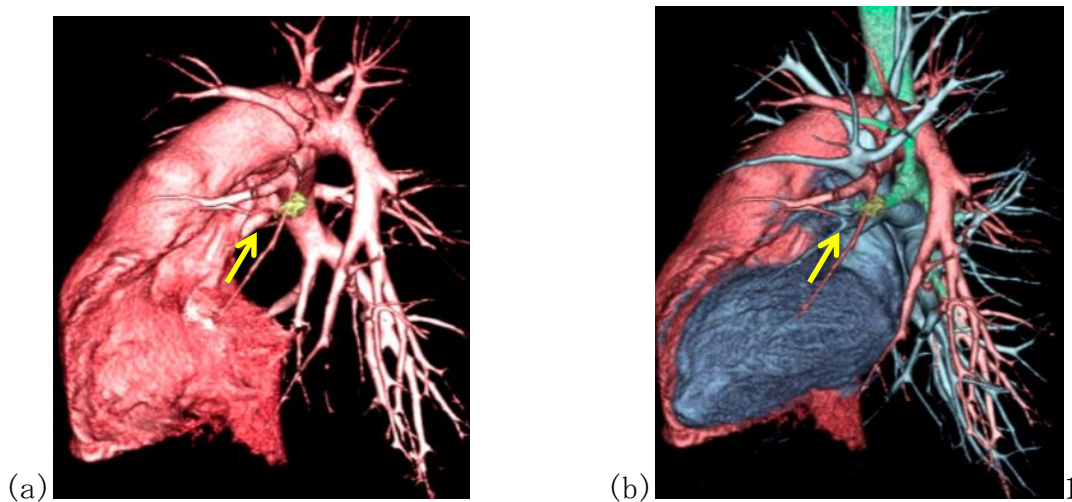


図 6. (a)左肺動脈のみ描出した 3D-CT, (b)左肺動脈，左肺静脈，気管・気管支を同時に描出した 3D-CT

肺動脈と気管支を同時に描出することで，その方向性をより詳細に読影することが可能となる．

【第二章】読影能のラーニングカーブについての検討

＜緒言＞

前章の研究（第一章）より，3D-CT の描出能は術前シミュレーションのモデルティールとして応用可能と判断したが，3D-CT の読影能には検討の余地があることが判明した．読影方法に関する報告はないが，肺動脈と気管支を同時に描出した画像を使用することで，その血管の（特に亜区域枝について）分枝をより正確に把握することが可能と考えられた．読影方法を改良した上で，読影の経験数を重ねることで読影能が改善する可能性があると考えた．そこで読影に関するラーニングカーブが存在すると仮定し，次の研究を計画した．当科では胸腔鏡手術を録画した DVD を常時閲覧することが可能な状況にある．これまでに 3D-CT 再構築されている肺区域切除・肺葉切除症例について，胸腔鏡手術の DVD 録画画像による術中所見と照合する読影トレーニングを施行し，その後，再度プロスペクティブに読影精度について検討することとした．

＜研究方法＞

読影トレーニングは 2009 年 3 月から同年 10 月までの 7 ヶ月間で，術前に 3D-CT 再構築されている肺葉切除・区域切除症例 150 例について，手術部位の肺動脈（区域枝，亜区域枝）について読影し，その結果を手術録画による術中所見と照合した．

第一章での研究期間で検討したものを前期群，上記読影トレーニング後の 2009 年 11 月から 2010 年 2 月までの期間を後期群として読影能を比較した．後期群では手術部位を右上葉に限定せずに，術前 3D-CT を施行した肺葉切除ならびに区域切除症例 14 例（右上葉切除 2 例，右中葉切除 1 例，右下葉切除 3 例，左上葉切除 2 例，左下葉切除 2 例，区域切除 4 例）について，3D-CT を用いて肺動脈を術前に読影し，術中所見と照合した．読影能について前期群と比較した．有意差検定には χ^2 検定を用い， $p<0.05$ を統計学的有意とした．

＜研究結果＞

読影能の結果について表 6 に示す．読影部位は異なるものの，後期群では区域枝 100%，亜区域枝 92.9%と前期群と比較して有意差は認めないが読影能は改善した．また，完全一致率を前期群と後期群で比較したところ，47.8%に対して 92.8%と有意差を持って（ $p=0.01$ ）後期群で改善を認めた（図 7）．

表 6. 術前 3D-CT 読影能の比較

	症例数 (%)		p 値
	前期群 (n=23)	後期群 (n=14)	
区域枝	18 例 (18/23) (78.2%)	14 例 (14/14) (100%)	0.134
亜区域枝	14 例 (14/23) (60.9%)	13 例 (13/14) (92.9%)	0.059

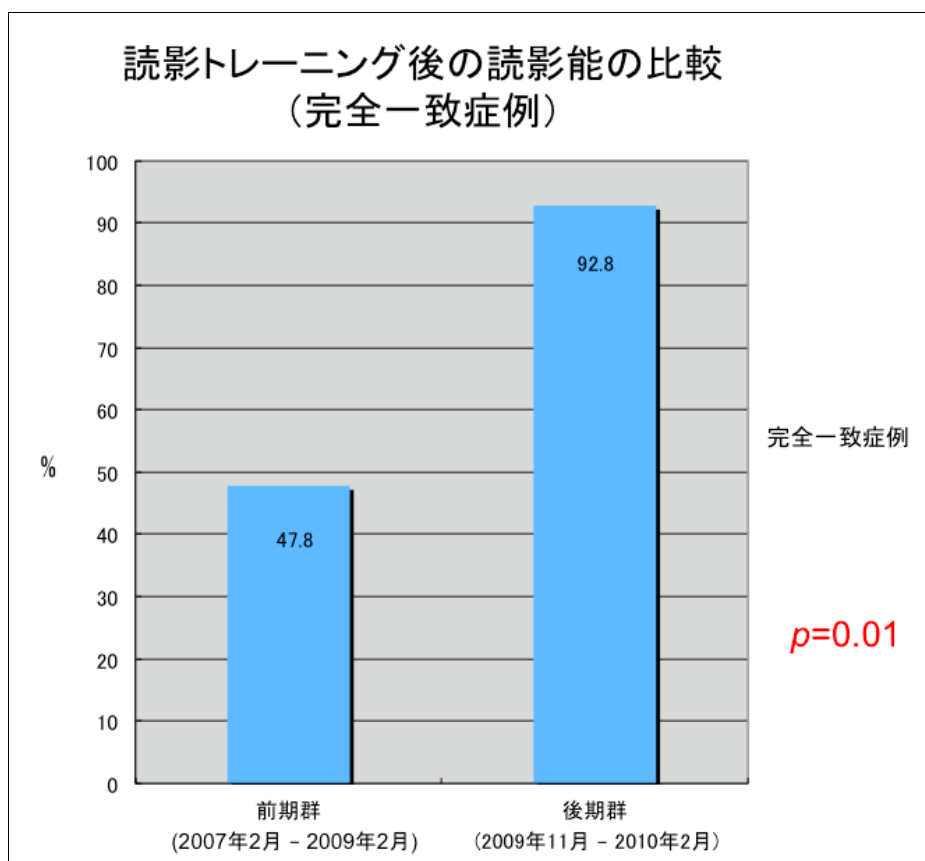


図 7. 読影トレーニング後の読影能の比較

前期群 47.8%, 後期群 92.8%と有意差をもって後期群での完全一致率の改善を認めた.

<考察>

読影方法を改良し, 読影トレーニングを施行した結果, 有意差をもって完全一致率の改善が得られた. 読影能に関してラーニングカーブが存在したことが証明された. Gyftopoulos らによる肩関節窩の骨の減少量の測定における診断精度について MRI と CT とで比較した研究において, この研究までに肩関節窩の骨の減少量の測定をしたことのない放射線科医が, 精通した読影者と共に読影する訓練を行うことでその読影の精度は向上したことから, 測

定の精度はトレーニングのレベルと相関し、読影方法を習得するまでにラーニングカーブが期待されると考察している²⁰。今回の研究ではプラトーに到達する期間、症例数に関する検討は行っていないが、3D-CT 読影結果と胸腔鏡手術の DVD 録画画像を用いて照合する読影トレーニングが読影能の向上に有用であったことが示唆される。また、前述の Gyftopoulos らの考察のように、精通した読影者とトレーニングすることでより早期に読影のポイントや、コツを掴むことが可能かもしれない。読影方法の改善、読影トレーニングを施行した際に、次の 3D-CT 読影の重要なポイントが浮上した。①区域・亜区域構造は気管支単位で分布しているため、肺動静脈、気管支を同時に描出されている画像を用いる、②血管造影検査では血管内腔のみを構築しているため、3D-CT では共通幹を別個の血管と誤認する可能性がある。すなわち血管壁などの構造物が存在していることを認識する必要がある（図 8）、③3D-CT では葉間面、区域間面は描出されないこと念頭に置くことである。

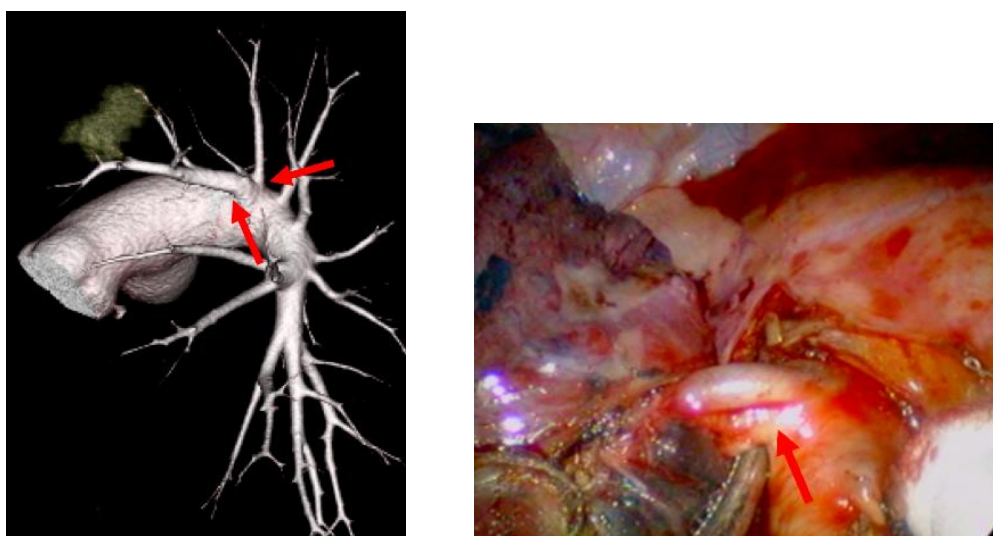


図 8. 3D-CT 画像と術中所見の比較(左上葉)

術前 3D-CT では別々に分岐する血管と読影したが、手術所見では共通幹を成していた。血管造影検査では血管腔内のみが描出されているが、実際には血管壁や周囲の脂肪織の厚みが加わることを念頭に置く必要がある。

3D-CT では心膜や大動脈などの縦隔構造物や葉間面などの肺血管周囲の構造物は構築されていない。これらを同時に描出することでより多くの情報が術前に得られる可能性もある。一方で同時に多数の情報を描出することが他の情報の妨げになる可能性もある。従来薄切 CT や個々の血管の画像を並列にして確認することも重要である。3D-CT の描出能とともに、今回の研

究で得られた読影方法の改善をもって， 3D-CT は呼吸器外科手術前シミュレーションとして有用なモダリティであると結論した．そこで 3D-CT を呼吸器外科手術に役立てるために，肺葉切除・区域切除術の視点から重要なキーとなる血管分岐形式を新たに分類することが可能と考えた．

【第三章】肺血管の区域解剖の分類

＜緒言＞

肺葉切除術, 区域切除術を正確に, 安全に行うためには外科解剖(surgical anatomy) の理解が不可欠であるが, 気管支, 肺動脈, 肺静脈の解剖には多くの破格が存在することが古くから報告されている. 肺血管, 区域解剖に関する研究は 1889 年に Ewart によって報告され²¹, その後諸家によって改定されてきた. 日本では 1950 年代に献体を用いた研究から Yamashita により分類, 集計され⁸, それをもとに, 外科の視点を加え荒井らが「肺切除術」で区域解剖や, 区域切除を解説している⁷. しかし, 従来の方法では, 破格の分類や頻度を知るに過ぎない. 左右肺動脈・肺静脈の標準的解剖図を Shields らの General Thoracic Surgery より引用して解説する (図 9, 図 10)²².

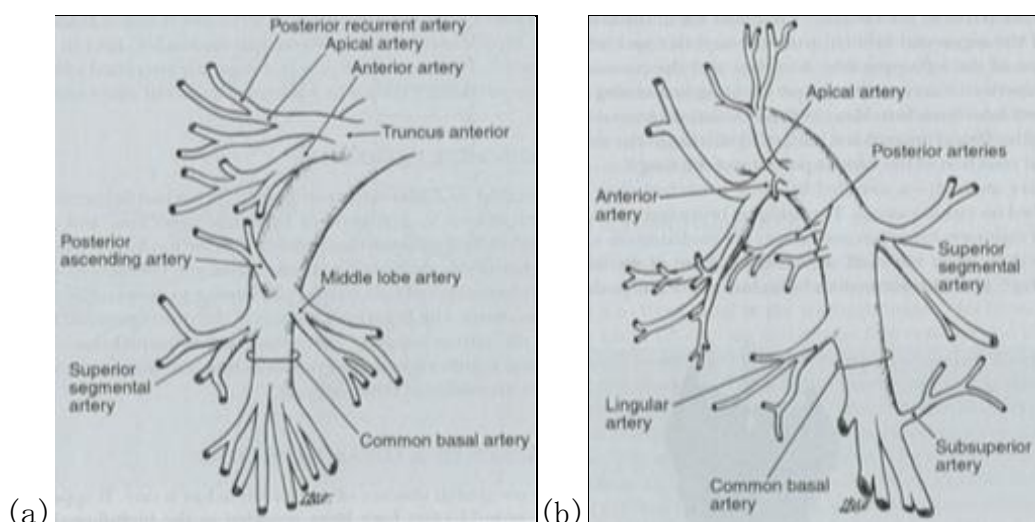


図 9. 肺動脈の標準的解剖 (General Thoracic Surgery より引用²²)

(a). 右肺動脈, (b). 左肺動脈

総肺動脈は右心室から出ると, 左主気管支の前面で左右肺動脈幹に分かれる. 右肺動脈幹は左側のそれよりも長く, 水平には走向し上行大動脈, 上大静脈の後方を横切り, やや下方から肺門に入る. 肺門部では気管支の前内側に位置しており, 最初に分岐するのが上幹動脈である. 上幹動脈の起始部から下葉肺動脈の最初の分枝である A^6 が出るまでの間を中幹と呼ぶ. この中幹から上葉や中葉への分枝が出ている. A^6 が分岐した後から底区動脈となる. 左肺動脈幹は右と分かれたのち斜め後方へ走向し, 下降大動脈の前方で左主気管支の上を乗り越えて交差したのち下降する. まず上葉へ向かう肺動脈枝を出し, その後, 下葉肺動脈の第 1 枝である A^6 を出す. 右との相違として

A⁶を分岐した後も上葉へ向かう肺動脈枝を出す。

肺静脈の分岐走向は気管支系，動脈系に比べて著しく相違している（図10）．抹消の毛細血管から始まった小静脈は中枢に向かうにつれ次第に集合して，小葉静脈，小区静脈を形成し，それが相集まって区域静脈となる．区域静脈は肺門部に集合し，肺葉静脈さらに上下肺静脈となって左心房へ流入する⁷．

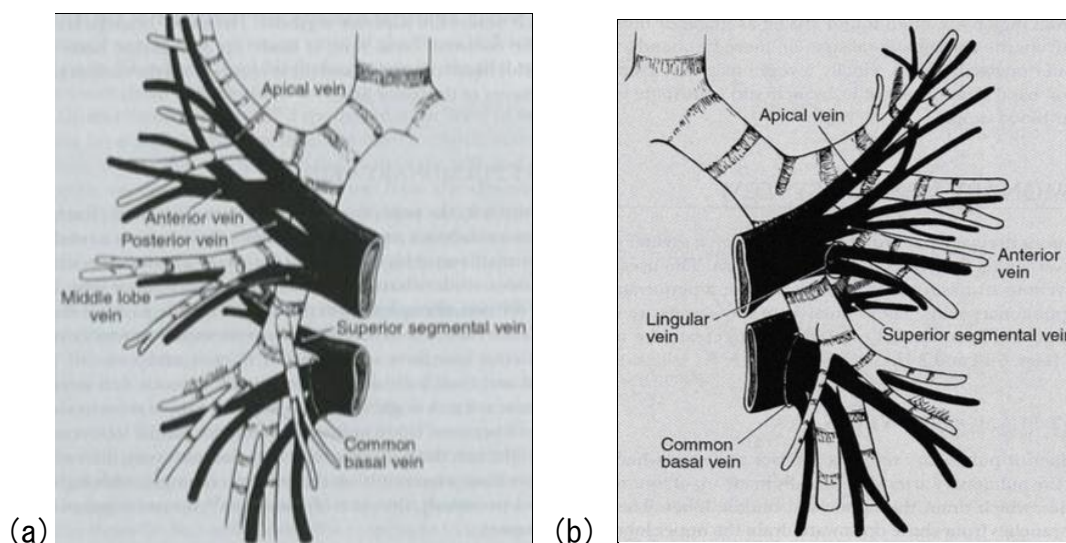


図10. 肺静脈の標準的解剖（General Thoracic Surgeryより引用²²）

(a). 右肺静脈, (b). 左肺静脈

一方，3D-CTにより生体内の血管を個別に3D表示することで，個々の手術シミュレーションとして利用できるようになった．また，従来の研究では報告されていない新たな破格も報告されるようになった^{12, 15, 16, 18, 23}．

術前に肺動静脈の走行や破格を把握しない場合のリスクが存在する．そのいくつかの例をシェーマと共に解説する．

例1：左上区域切除における縦隔型舌区肺動脈枝の破格について．区域動脈の破格では最も多い前述した左縦隔型舌区枝は，上区域切除の際には温存すべき血管である．しかし並走する上区域枝であるA³とは術中の区別が困難な場合がある．上区域切除の際にこの縦隔型舌区域枝を上区域の分枝と誤認する可能性がある（図10）．また，上区域枝に近接走行するこの縦隔型舌区域枝の走行を認識していないと，気管支を切離する際に損傷する可能性がある（図1参照）．

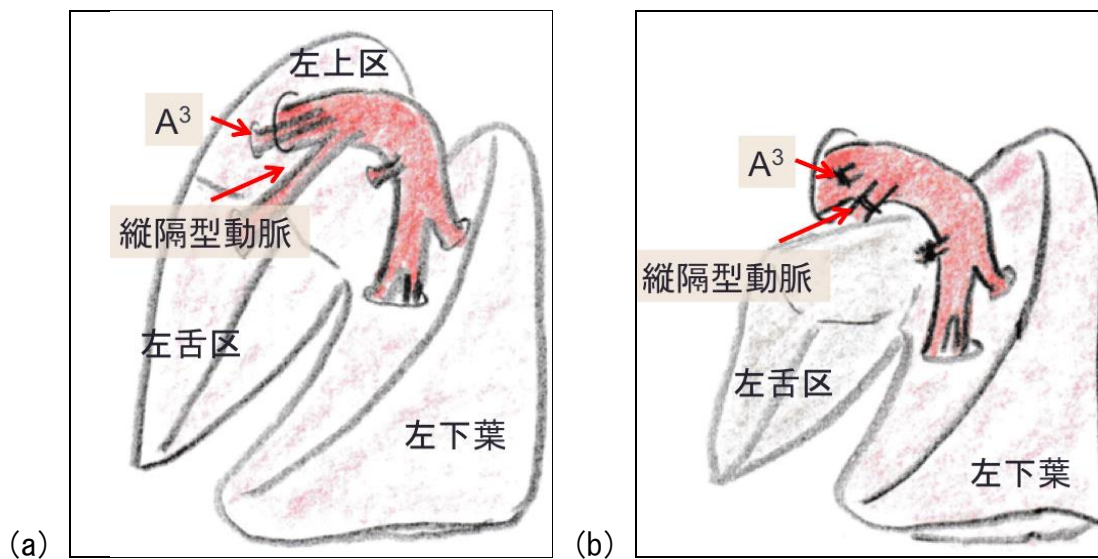
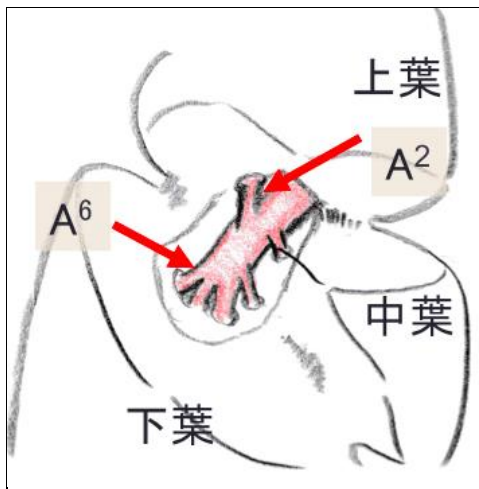


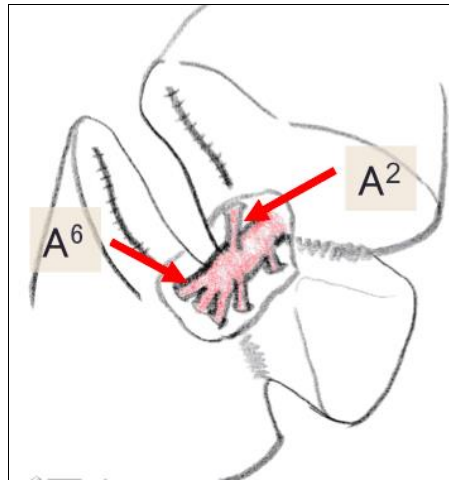
図 11. 左上区域切除の際の要点

縦隔型舌区動脈が存在する際には A^3 との位置関係に注意が必要である。誤認して切離してしまうと舌区域の虚血となる、

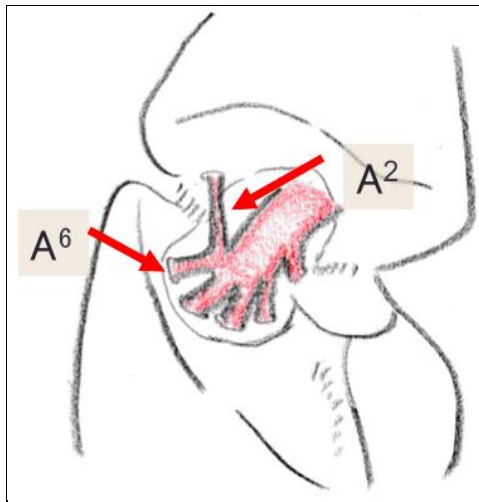
例 2：葉間を横断する破格，共通幹について．術中，片側換気により虚脱させた肺をあらゆる方向に牽引するため肺動脈の枝の同定が困難な場合がある．さらに，下葉枝と上葉枝（上行動脈）が共通幹を成している場合にはその同定がさらに困難となる．術前に含気下で作成された 3D-CT では，気管支などの他の構造物との位置関係を把握することが可能で血管の走行や共通幹の情報を正確に術前に把握することができる（図 12b）．



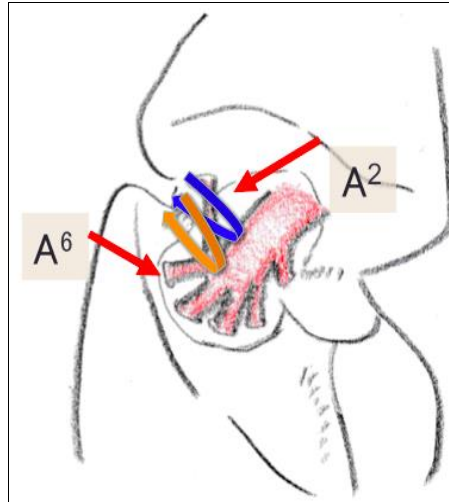
(a-1)



(a-2)



(b-1)



(b-2)

図 12. 呼吸器外科手術の要点(右肺上下葉間形成).

(a-1) A^6 と A^2 が共通幹を有さない場合, (a-2) 葉間形成後, (b-1) A^6 と A^2 が共通幹を成す場合, (b-2). 下葉切除の場合, 上葉 A^2 を下葉 A^6 と誤認したり, 葉間形成時の損傷や虚血の原因となる(青矢印). 葉間形成すべき場所(橙矢印).

上述のように呼吸器外科手術において手術前に正常の肺血管の走行のみならず破格を把握することは, 手術の正確さ, 安全の確保に有用である. その有用性を証明した報告は少ない. そこで, 呼吸器外科手術に重要な外科解剖 (surgical anatomy) を念頭においた正常の血管分岐形式と破格を新たに分類, 集計し既存の報告と比較する.

＜研究方法＞

2007年2月から2010年9月までの術前に3D-CTを施行した肺切除症例194例中、腫瘍や無気肺などの二次性変化のため肺血管の描出不良であったものを除き、すべての肺葉について肺動脈、肺静脈の分岐形式の分類表を作成した（表7）。各肺葉の症例数は、右上葉；189例、右中葉；189例、右下葉；192例、左上葉；187例、左下葉；188例であった。

CT機器はこれまでと同様に64列MDCT（東芝：Aquilion 64 rows）を用い、機械式インジェクター（根本杏林堂、Dual shot GX）を使用して経静脈造影（400mg I/kg）を施行した。造影剤は上腕静脈より13秒間同圧で注入し、その後生理食塩水を12秒間注入した。放射線技師により3D DICOMデータをボリュームレンダリング法により肺動静脈、気管支、腫瘍を4色で表示した。CT撮像は以下のパラメーター、X線管回転速度0.35秒/回転、ヘリカルピッチ45、管電圧120kV、管電流300mA、で行い、再構築はワークステーションZio（Zio Software）を使用して、スライス厚0.5mm、再構築間隔0.3mmで行った。撮影は深吸気位で息止めを行い、肺動脈と肺静脈のそれぞれの血管のCT値を高く保つため2回の撮影を行った。また、肺区域はInternational nomenclatureに基づき分類した²⁴。表7を用いて肺動脈・静脈について集計し、既存の報告と比較し、これまでに分類されていない破格について呼吸器外科手術の視点から特殊型（葉間や区域間を横断する肺動脈や肺静脈の流入部位が通常と異なる分枝と定義）を追加し新分類を作成する。

表 7. 3D-CT 読影結果集計表

ID	氏名	3DCT撮影日		
			型	その他 解説
右上葉	動脈	上葉枝の枝	1本型・2本型・3本型	2本型(Tr.sup.AとAscending A2b が80%)
		A1について(A3との関係)	別々型・A3→A1型	別々型(Tr.sup.AからA1とA3が別々)
		A2について	上行と回帰型 回帰動脈型・上行動脈型	上行(Ascending A2b)と回帰(Recurrent A2a)が多い
	静脈	A3abについて	上幹型・上幹と下幹型・上行型	上幹(Tr.sup.AのみからA3a+b) 上行型(Asc.A2+A3b)
		V1とV2とV3	V1とV2+3型・V1+2とV3型・V1欠損型	V1とV2+3(肺尖と中心静脈型)最多 V1+2とV3(肺尖静脈型) V1欠損型はV2+V3のみ(いわゆる中心静脈型)
右中葉	コメント			
	動脈	中葉枝の本数	1本型・2本型・3本型	2本が50%(中核からA5、A4の順)、中核から1本40%
		分岐レベル(A6と比較)	同レベル・高位型・末梢型*	1本だと高位、2本だと1本はA6より末梢が多い
	静脈	特殊型	下葉(A8・)より分枝	
		中葉枝の本数	1本型・2本型・3本型	2本型、枝に入るものも少なくない(40%)
右下葉	動脈	流入先	上肺静脈・上肺静脈の枝・下肺静脈の枝*	その枝()
		単独で左房		*複数回答あり
		コメント		
	静脈	A6の本数	1本型・2本型・3本型	
		特殊型	A6から上葉へ(A2b)	
左上葉	動脈	A8A9A10について	A8とA9+10型・A8+9とA10型・3分岐型	A8とA9+10型が90%
		下葉枝の本数	V6と肺底静脈・V6と上-下肺底静脈	
		V6の特殊型	上葉に入る・	
	静脈	その他の特殊型	肺靱帯静脈	Ligamentary vein
		コメント		
左下葉	動脈	A3 A1+2 A4+5	縦隔のみ・縦隔+葉間型	
		葉間型A4+5	1本型・2本型・3本型・4本型/A3との共通幹あり/なし	
		縦隔型A4+5	葉間型(1本・2本)、縦隔+葉間型、縦隔型のみ	
	静脈	A8から分岐するA4+5		
		コメント		
左下葉	動脈	V1とV2とV3	肺尖静脈型・肺尖中心静脈型・中心静脈型	
		V1とV2+3(Central type)		
		V1+2とV3(Semi-central)		
	静脈	A6 A8+9+10	A8 A9+10、A8+9 A10、3分岐型	
		正常		

＜研究結果 1 (肺動脈)＞

肺動脈の分類結果について表 8～12 に示す. 右上, 中, 下葉肺動脈, 左上, 下葉肺動脈の順に掲載する.

1. 右肺動脈

a. 上葉肺動脈

右上葉の分岐型, Posterior artery(A²)の分類型は既存の報告とほぼ同様の結果であった. また, A²に関して Apical artery(A⁶)と共通管を有し, 葉間をまたいで走行する上行動脈の存在が知られているが, 本研究では 10 例(5.3%)で認められ, これを特殊型とした. 上葉枝の本数でみると最多 5 本存在する症例が 1 例(0.5%)で認められた(表 8).

表 8. 肺動脈(右上葉)

分類型	自験例 % (例)	Yamashita ⁸ %
I 型 (上幹型)	6.9 (13/189)	5.9
II 型 (上幹+下幹)	1.6 (3/189)	3.0
III 型 (上幹+上行)	80.4 (152/189)	78.0
IV 型 (上幹+下幹+上行)	11.1 (21/189)	13
A ² の分岐型		
回帰動脈型	12.7 (24/189)	12.0
上行動脈型	17.5 (33/189)	16.0
回帰動脈+上行動脈型	69.8 (132/189)	72.0
特殊型		
A ⁶ から上行 A ² or/and 上行 A ³ が分岐	5.3 (10/189)	6.0
上葉枝の本数		
1 本型	6.9 (13/189)	4.0
2 本型	67.2 (127/189)	64.0
3 本型	22.2 (42/189)	22.0
4 本型	3.2 (6/189)	10.0
5 本型	0.5 (1/189)	—

b. 中葉肺動脈

分枝本数は 2 本型が 118 例 (62.4%) と最も多かった。また、肺動脈下葉枝から葉間をまたいで中葉に分岐する Lateral artery (A⁴), Medial artery (A⁵) が認められ、これを特殊型とした (表 9)。

表 9. 肺動脈(右中葉)

中葉枝の本数	自験例% (例)	Yamashita ⁸ %
1 本	36.0 (68/189)	42.5
2 本	62.4 (118/189)	53.4
3 本	1.6 (3/189)	4.1
特殊型		
A ⁸ から A ⁴ が分岐	0.5 (1/189)	—
A ⁷ または A ⁸ から A ⁵ が分岐	2.1 (3/189)	—

c. 下葉肺動脈

A⁶ の分岐本数, Medial basal artery(A⁷) の分岐型, Anterior basal artery(A⁸), Lateral basal artery(A⁹), Posterior basal artery(A¹⁰) の分岐型を分類した. A⁷ は Yamashita の報告でも欠損している症例が 6.0%で存在すると報告されている. 本研究では欠損しているのか, 2mm 以下のため描出されていないのかは判別不能であった. そのため, 「欠損 or 同定不可」とした. また, A⁷ に関して, これまでの報告と同様 A⁸ と共通幹を有するものが多く認められた. A⁷ の分岐レベルは肺葉切除または区域切除において重要な情報と考えられるため詳細に検討した. また, A⁶ と A¹⁰ の間から分岐する Subsuperior artery(A*) は 22 例 (11.5%) で認められた (表 10).

表 10. 肺動脈(右下葉)

A ⁶ の本数	自験例%(例)	Yamashita ⁸ %
1 本	80.7(155/192)	78.0
2 本	19.3(37/192)	20.0
A* の分岐		
A*	11.5(22/192)	22.0
A ⁷ の分岐型		
欠損 or 同定不可	5.7(11/192)	6.0
単独型	40.1(77/192)	34.0
A ⁶ と同レベル	2.6	
A ⁶ と A ⁸⁻¹⁰ の間	35.4	
A ⁸⁻¹⁰ と同レベル	2.1	
A ⁸ と共通幹	53.1(102/192)	60.0
A ¹⁰ から	1.0(2/192)	—
A ⁸⁻¹⁰ の分岐型		
A ⁸ , A ⁹⁺¹⁰ 型	78.1(150/192)	90.0
A ⁸⁺⁹ , A ¹⁰ 型	19.3(37/192)	8.0
3 分岐型	2.6(5/192)	2.0

2. 左肺動脈

a. 上葉肺動脈

Apicoposterior artery(A¹⁺²) の分岐本数, Anterior artery(A³) の分岐型, Superior lingual artery(A⁴), Inferior lingual artery(A⁵) の分岐型につ

いて分類した． A^4 ， A^5 は肺動脈根部から縦隔面を走行する縦隔型舌区動脈の存在が知られており，肺葉切除，区域切除では注意を要する正常の分岐である．Yamashita の報告では縦隔型舌区動脈は 30.0%で認められ，そのうち分けは縦隔型のみ 18.0%，縦隔型＋葉間型 12.0%であった⁸．本研究では縦隔型舌区動脈は 66 例（35.3%）で認められ，縦隔型のみ 9 例（4.8%），縦隔型＋葉間型 57 例（30.5%）と「完全」縦隔型は希少であった．右上葉肺動脈と同様 Anterior basal artery(A^8)と共通幹を有する A^4 ， A^5 が 43 例（23.0%）で認められた．これら葉間・区域間をまたいで分岐する肺動脈を特殊型とした．左上葉では特殊型は 27.3%（51/187）と他肺葉と比較して高頻度に存在することがわかった（表 11）．

表 11. 肺動脈(左上葉)

A ¹⁺² の本数	自験例%（例）	Yamashita ⁸ %
1 本	8. 6 (16/187)	15. 0
2 本	53. 5 (100/187)	57. 0
3 本	33. 7 (63/187)	28. 0
4 本	4. 3 (8/187)	稀
A ³ の分岐型		
縦隔型	84. 5 (158/187)	90. 0
縦隔+葉間	15. 5 (29/187)	10. 0
A ⁴ , A ⁵ の分岐型		
<u>縦隔型</u>		
縦隔型のみ	4. 8 (9/187)	18. 0
縦隔+葉間（1 本）	29. 4 (55/187)	12. 0
縦隔+葉間（2 本）	1. 1 (2/187)	
<u>葉間型</u>		
葉間のみ（1 本）	44. 9 (84/187)	44. 0
葉間のみ（2 本）	19. 8 (37/187)	26. 0
特殊型		
A ⁸ から A ⁵ が分岐	8. 7 (13/187)	
A ⁸ から A ⁴⁺⁵ が分岐	14. 0 (21/187)	
A ⁸ から A ⁴ が分岐	6. 0 (9/187)	
A ⁴ から A ¹⁺² _c が分岐	0. 5 (1/187)	
A ⁴⁺⁵ から A ¹⁺² _c が分岐	1. 1 (2/187)	
A ⁴⁺⁵ から A ³ _c が分岐	2. 7 (5/187)	

b. 下葉肺動脈

Apical artery (A⁶) の分岐本数, Subsuperior artery (A^{*}), Anterior basal artery (A⁸), Lateral basal artery (A⁹), Posterior basal artery (A¹⁰) の分岐型について分類した. 頻度に関しては既存の報告とほぼ同程度の割合であったが, A^{*} の割合は 6. 4% (12/188) と Yamashita の報告と比較して半分程度であった. また, 特殊型として A⁸ が 2 本存在する症例と, A⁴⁺⁵ と共通幹を有する A⁸ を分類した.

表 12. 肺動脈(左下葉)

A ⁶ の本数	自験例%	Yamashita ⁸ %
1本	84.6(159/188)	80.0
2本	15.4(29/188)	20.0
A*の分岐		
A*	6.4(12/188)	13.3
A ⁸⁻¹⁰ の分岐		
A ⁸ , A ⁹⁺¹⁰	64.7(121/188)	74.0
A ⁸⁺⁹ , A ¹⁰	32.6(61/188)	16.0
3分岐	2.7(5/188)	10.0
その他	0.5(1/188)	
特殊型		
A ⁸ 2本	2.1(4/188)	
A ⁴⁺⁵ から A ⁸ が分岐	0.5(1/188)	

＜研究結果 2（肺静脈）＞

肺静脈の分類結果について表 13～17 に示す．肺動脈と同様，右上，中，下葉肺静脈，左上，下葉肺静脈の順に掲載する．

1. 右肺静脈

a. 右上葉肺静脈

枝の分岐型の頻度について分類した．Yamashita の報告と同程度の結果であった．右上葉肺静脈の流入部位は典型例では上肺静脈（SPV）であるが，本研究では下肺静脈（IPV）に流入する右上葉肺静脈が 7 例（3.7%）で，左心房（LA）に直接流入する枝が 2 例（1.1%）で認められた．また、破格として Posterior vein (V²) が気管支の背側を下降し SPV，IPV や LA，下葉肺静脈枝である Apical Vein (V⁶) に流入する枝が認められ，これらを特殊型と分類した（表 13）．

表 13. 肺静脈(右上葉)

肺静脈右上葉の分岐型	自験例%(例)	Yamashita ⁸ %
肺尖+中心静脈型 (I ab)	54.0(102/189)	50.0
肺尖+中心静脈型 (I b)	24.3(46/189)	20.0
肺尖静脈型 (II)	12.7(24/189)	22.0
中心静脈型 (III)	9.0(17/189)	8.0
特殊型		
V ² が中間気管支間の背側から SPV へ流入	1.1(2/189)	—
V ³ が中葉枝へ流入	0.5(1/189)	18.2
V ² が中間気管支幹の背側から IPV へ流入	3.7(7/189)	2.4
V ² が中間気管支幹の背側から LA へ流入	1.1(2/189)	—
V ² が中間気管支幹の背側から V ⁶ へ流入	1.6(3/189)	—

b. 中葉肺静脈

本数の分類を行った。流入部位に関して、中葉枝は右上葉枝と同様 SPV である場合が多く 160 例 (84.7%) であるが、13 例 (6.9%) で IPV に、14 例 (7.4%) で LA に直接流入する破格が認められた。これらを特殊型として分類した (表 14)。

表 14. 肺静脈(右中葉)

肺静脈中葉枝の本数	自験例%(例)	Yamashita ⁸ %
1本	66.7(127/189)	52.0
2本	32.3(61/189)	40.0
3本	0.5(1/189)	8.0
流入先		
SPV	84.7(160/189)	94.0
IPV	6.9(13/189)	6.0
LA	7.4(14/189)	—

c. 下葉肺静脈

分岐型について分類したがこれまでの報告と同程度の割合であった。V⁶が直接 LA に流入する破格を 15 例 (7.8%) で認めた。そのうち 2 例 (1.0%) は V²が V⁶に合流しその後 LA に流入する破格であり、これら流入部の破格を認めたものを特殊型と分類した (表 15)。

表 15. 肺静脈(右下葉)

右肺静脈下葉枝の分岐	自験例%(例)	Yamashita ⁸ %
V^8, V^{9+10}	45.8(88/189)	40.0
V^{8+9}, V^{10}	48.4(93/189)	50.0
3 分岐型	5.7(11/189)	10.0
特殊型		
V^6 が LA へ流入	6.8(13/189)	—
$V^2 \rightarrow V^6$ が LA へ流入	1.0(2/189)	—
V^6 が SPV へ流入	1.6(3/189)	—

2. 左肺静脈

a. 上葉肺静脈

分岐型を分類した。これまでの Yamashita の報告とほぼ同程度であった。流入部の破格として Superior lingual vein(V^4) が区域間をまたいで Anterior vein(V^3)に流入する症例を 2 例 (1.1%) で , lingual vein(V^5)が IPV, LA 流入する症例をそれぞれ 1 例 (0.5%) で認め、特殊型と分類した (表 16)。

表 16. 肺静脈(左上葉)

分岐型	自験例%(例)	Yamashita ⁸ %
肺尖静脈型 (I)	70.6(132/187)	66.0
肺尖+中心静脈型 (II)	28.3(53/187)	30.0
中心静脈型 (III)	1.1(2/187)	4.0
特殊型		
V^5 が LA へ流入	0.5(1/187)	—
V^4 が V^3 へ流入	1.1(2/187)	—
V^5 が IPV へ流入	0.5(1/187)	—

b. 左下葉肺静脈

破格は認められず、分岐型の頻度も Yamashita の報告と同程度であった (表 17)。

表 17. 肺静脈(左下葉)

V ⁸⁻¹⁰ の分岐型	自験例%(例)	Yamashita ⁸ %
V ⁸ , V ⁹⁺¹⁰	45.7(86/188)	58.0
V ⁸⁺⁹ , V ¹⁰	43.6(82/188)	34.0
3分岐型	10.6(20/188)	8.0

＜考察＞

手術の精度, 安全性の確保を目的として, 手術操作時に特に注意を要する破格を意識した新たな項目とその頻度を追加し新分類を作成した. すなわち, 葉間を横断する血管, 共通幹の存在, 経路が異なる分岐などである. 呼吸器外科手術において癒着や分葉不全は手術難易度をあげ, 予期しない肺動脈, 静脈の出現はしばしば外科医を驚かせる. 例えば, 「下葉区域動脈から分岐する上葉区域動脈 (*A⁶ から A^{2b} が分岐)», 「下肺静脈に流入する中葉肺静脈 (*V⁴⁺⁵ が IPV に流入)」などである. これらの破格を認識できないと, 温存すべき血管を結紮処理したり, 葉間切離の際に損傷したりする危険がある. 献体解剖から集積された Yamashita の報告⁸を本研究では生体, 手術所見に基づき比較検証した. 概ね同頻度であったが, 左舌区動脈に関しては頻度に乖離を認めた. Yamashita による報告では縦隔型のみのいわゆる「完全縦隔型」は 18.0%である⁸のに対して, 本研究では 4.8%と希少で縦隔+葉間型は 33.0%存在している. 一般的に縦隔型が存在する場合, 葉間型の血管径は細い傾向にある. 献体解剖では血流循環が存在しないので, 縦隔型のみの分岐型を確認した際に他の葉間型の枝を同定しづらかった可能性がある. 左舌区動脈の縦隔型は区域切除でも上葉切除においても重要な情報である. また Yamashita による報告⁸では分類されていない分枝が少なからず存在した. その破格と頻度を「特殊型」として項目を追加した. 肺動脈に関して, Sivrikoz らは 85 例の肺葉手術で 10 例に破格を認めたと報告している²⁵. Subotich らの肺切除を行った 140 症例をまとめた報告では, 23 例(16.4%)で肺血管に破格を認め, そのうち 12 症例は右中葉, 7 症例は左舌区の肺血管の破格であったと報告しており, 右中葉肺動脈の破格は 8 症例, 左肺動脈舌区域枝では 5 症例であった²⁶. Sonoda らは 3D-CT によって A⁴⁺⁵ と A⁸⁺⁹⁺¹⁰ が共通幹を有する縦隔型底区動脈を術前に認識することが可能であったと報告している²⁷. 本研究結果から肺動脈について左上葉肺動脈で葉間・区域間を横断する肺動脈が最も多く, 注意が必要である.

肺静脈に関してはさらに多くの破格が存在することが知られている. Arslan らは上葉肺静脈の一部 V²からのドレナージ静脈として中間気管支幹

の背側を通過し SPV, LA, IPV に流入する静脈について Right top pulmonary vein と称して報告し、その頻度は 2.2%としている²⁸。この静脈は本研究で右上葉肺静脈の特殊型として V² が中間気管支幹の背側を通過する静脈と分類したものと同類のものと考えられる。本研究では 7.4% (14/189) であった。Marom らの肺静脈の左心房への流入部に関する 201 例の検討では、右側で 71.0% が 2 本存在し、28.0% が 3-5 本存在、左側では 86.0% が 2 本の肺静脈を有していると報告している。また、上肺静脈と下肺静脈が共通幹となっている症例は右側で 2.0%、左側で 14.0% と報告している²⁹。Cronin らは心房細動の患者 200 例に対して MDCT を用いて肺静脈の流入部について検討したところ、これまでの報告より多い破格を認めたとし、標準的な 4 本の肺静脈（左右 2 本ずつ）は 82.0% であり、右側に多く破格が存在すると報告している³⁰。Akiba は 3D-CT で右中葉肺静脈（V⁴）が IPV に流入することを術前に認識することが可能であったと報告をしており³¹、その後の 2010 年に呼吸器外科手術を対象として 3D-CT を用いた肺静脈の検討を初めて報告した。そこでは右側では 86.0%、左側では 98.0% が通常の解剖であったとし、右側で 10.0% が 3 本の肺静脈を、4.0% で 4-5 本の肺静脈を有していると報告している³²。肺静脈の流入部位の破格で分類すると、Marom らは破格の多い静脈を右中葉枝とし、右中葉肺静脈が SPV に流入するのが 68.0%、IPV が 3.0%、LA が 22.0% であり、V⁶ が LA に流入するのが 1.0% と報告している²⁹。Cronin らは右中葉肺静脈の流入部位に関して SPV が 83.5%、IPV が 5.5%、LA が 11.0% と報告している³⁰。Akiba らは 126 症例中、右中葉肺静脈の流入部位の破格は IPV が 4 例（3.2%）、LA が 10 例（7.9%）と報告している³²。左肺静脈に関しては Marom らも Cronin らも総肺静脈幹についてまとめているが、流入部の破格に関しては分類していない。Akiba らは舌区静脈が IPV に流入したものが 2.0% で認められたと報告している³²。本研究では 1 例（0.5%）の頻度であった。Aragaki らは左肺静脈上区域枝 V² が気管支の背側を通過し IPV に流入する破格の報告をしているが³³、この破格は本研究では認めなかった。Fourdrain らは肺静脈の破格について 100 例で検討し 36 症例（36.0%）で破格を認めたと報告している（右 25 症例（25.0%）、左 11 症例（11.0%））。右肺静脈で最も多い破格は 3 本の肺静脈の存在であり（16.0%）、右中葉肺静脈が直接 LA に流入する破格は 10 例（10.0%）で認められた。左肺静脈では最も多い破格は肺静脈共通幹で 8.0% に認められた。舌区域静脈が IPV, LA に流入する破格はそれぞれ 1.0%、2.0% であった³⁴。肺静脈の流入部の破格について、すなわち本研究における特殊型の報告のまとめを表 18 に示す。肺静脈の破格について本研究では認めなかったが、3D-CT で評価可能であった

肺静脈還流異常症や、総肺静脈幹についての報告もされている^{35 36}。本研究で確認できていない肺血管の破格の報告例も多く存在している。これまでの分類に追加した新分類がすべての報告やその破格を網羅できているわけではない。撮影条件が施設ごとで異なることも考慮すると、単独施設での検討には限度があり、今後研究をさらに発展させるためには多施設共同での研究等も考慮することが必要であると考える。

表 18. 肺静脈特殊型の報告のまとめ

	Yamashita ⁸	Marom ²⁹	Cronin ³⁰	Akiba ³²	Fourdrain ³⁴	本研究
報告年	1978	2004	2007	2010	2017	2018
評価方法	献体	CT	MDCT	3D-CT	3D-CT	3D-CT
症例数	120	201	200	126	100	
						7.5
右上葉(%)	2.4			2.0		(15/189)
流入部位						
V ² →SPV						1.1
V ² →IPV	2.4					3.7
V ² →LA				2.0		1.1
V ² →V ⁶						1.6
						14.3
右中葉(%)	6.0	26.0	16.5	11.1	16.0	(27/189)
流入部位						
IPV	6.0	3.0	5.5	3.2	5.0	6.9
LA		22.0	11.0	7.9	11.0	7.4
V ⁶		1.0				
						9.4
右下葉(%)				5.0		(18/189)
流入部位						
V ⁶ →LA				3.0		7.8
V ⁶ →SPV				2.0	6.0	1.6
						2.1
左上葉(%)				2.0	3.0	(4/187)
流入部位						
舌区→LA					2.0	0.5
舌区→V ³						1.1
舌区→IPV				2.0	1.0	0.5
左下葉(%)				1.7		0(0/188)
流入部位						
V ⁸ →SPV				1.7		

【考察】

3D-CT は消化器領域をはじめ各分野で応用されてきている．脳神経外科領域では手術中に術前画像データを用いて，手術手技を画像内に同期させて行う Navigation Surgery が行われており⁹，また消化器外科領域では，腹腔鏡下胃癌手術における 3D-CT を用いた術前シミュレーションの報告にて，1) 右胃動脈の枝の認識することにより上幽門部のリンパ節郭清を容易にした，2) 左胃動脈から異常分岐する左肝動脈の描出により出血や肝虚血を防ぐことができた，3) 左胃静脈の確認によって安全にリンパ節郭清を施行できたとし，この結果，従来の CT 群と比較し手術時間は有意に短縮し，出血量および腹腔鏡手術から開腹手術への移行率に関して，有意差はないものの減少傾向にあったと報告している¹⁴．また Kobayashi らは，腹腔鏡下直腸手術におけるリンパ節郭清の際に，下腸間膜動脈から分岐する左結腸動脈の分岐パターンを 3D-CT を用いて評価し，有用であったと報告している³⁷．乳腺外科領域では，鏡視下乳房手術におけるセンチネルリンパ節の描出に 3D-CT リンパ管造影を用いた報告がある．センチネルリンパ節は腫瘍からのリンパ流を受ける最初のリンパ節と定義され，その生検によってより遠位に存在する腋窩リンパ節の転移を判断し，腋窩リンパ節郭清を省略するための情報を得ることができる．3D-CT リンパ管造影はリンパ流とリンパ節との詳細な関係を描出できると報告している³⁸．

呼吸器外科領域手術において，肺葉切除・区域切除術では肺動静脈を正確に同定し，正確に処理することが絶対条件である．肺動静脈の破格を術前 3D-CT を用いることにより同定することが可能であり，より安全に呼吸器外科手術を実施することが可能であった報告が散見される^{12, 15, 16}．Ohtaki らは 3D-CT は非定型的胸腔鏡下区域切除において必要不可欠であり，区域や区域間を分ける静脈の正確な同定を可能にすると報告し³⁹，Akiba らは特に胸腔鏡手術において術前 3D-CT は肺静脈の走行や分岐部の情報をもたらす有用な検査であるとし³²，Shimizu らは 3D-CT を用いた術前，術中ナビゲーションへの応用による区域切除の新たな方法についてその有用性を報告している⁴⁰．

肺解剖における中心的原理として，清水は 1) 肺は左右に 1 個ずつ計 2 個存在する，2) 右は上葉・中葉・下葉，左は上葉と下葉に分かれる，3) 肺動脈は左右に 1 本ずつ，肺静脈は左右に 2 本ずつ，上・下肺静脈が存在する，4) 上葉と中葉の血流は上肺静脈に還流し，下葉の静脈は下肺静脈に還流する，5) 上葉には上葉気管支，中葉には中葉気管支，下葉には下葉気管支が分岐している，と述べている⁴¹．これらの基本から外れるバリエーションの存在は，

温存すべき血管を結紮処理したり、葉間切離の際に損傷させたりする危険がある。従来はこれらを回避するために術中の注意深い観察に依存していた。しかし 3D-CT が出現したことによりこれらの存在や頻度を認識し、しかも術前に確認でき、手術の安全性や精度の向上に貢献すると考えられる。現在行っている 3D-CT では気管・気管支も描出しているが、今回の研究では気管支は対象としなかった。Akiba らは右上葉気管支の一部が主気管支または気管から分岐する Tracheal Bronchus の報告をしている⁴²。気管支と血管の位置関係や距離を計測できることも利点の一つと考える。

3D-CT は生体内の情報であり、術前シミュレーションとしての有用性は、1) 一度に肺動脈、肺静脈、気管支を描出することが可能であり、それぞれの位置関係を把握できる点、2) 3D-CT は血管造影と比較して低侵襲で簡便である点、3) 血管の分岐や分布を手術前に症例個別に検査できる点、4) 分葉不全の場合でも血管の分岐が詳細にシミュレーションすることが可能な点である。また、新たな分類法を用いて共通の認識を持つことで、手術方法を系統化し、外科医の教育にも寄与することが期待できる。Shimizu らは 3D-CT は胸腔鏡を通じてバーチャル手術視野を経験することができ、術前にバーチャル外科手術のシミュレーションをすることが可能であることから外科研修医の教育にも有用としている⁴³。

一方、本研究における 3D-CT の条件下では葉間、区域間や心膜を描出していない。これらを同時に描出することによって、葉間、区域間を横断する脈管の同定や肺門部の解剖認識に有用となるため、今後の検討課題としたい。最近では区域切除の際に腫瘍からの距離確保を術前に 3D-CT 上に virtual 3D safety margin として描出し、区域間静脈との位置関係を術前にシミュレーションするという報告もある⁴⁴。

また、本研究では 3D-CT を用いた術前シミュレーションの使用が手術の安全性や精度の向上に貢献することを証明するには至っていない。その理由として術者の技量、癒着やリンパ節腫大・転移、分葉不全など手術難易度が個々に異なることなどが挙げられる。Oizumi らは肺区域切除術の手術時間について、手術の難易度やラーニングカーブなどのバイアスがあるものの 3D-CT を用いた術前シミュレーションを行うことで、手術時間が短縮したと報告している。ラーニングカーブに起因するものの他に、手術の系統化が手術時間を短縮させることを可能にすると考察している²³。Hagiwara らは短期手術成績における 3D-CT の有効性と胸腔鏡手術を安全に施行するために肺血管枝のバリエーションと術前評価の有効性について報告をしている。この研究において胸腔鏡手術で肺葉切除または区域切除を施行された 179 症例中(肺

葉切除 172 例，区域切除 7 例)，術前 3D-CT を作成した 3D-CT 施行群 124 例（69%）と，アレルギーや重症糖尿病，喘息，造影検査を拒否した術前 3D-CT 未施行群 55 例（31%）についてレトロスペクティブに短期手術成績（手術時間，出血量，術後合併症率など）と血管描出能について比較検討された．結果は，3D-CT 施行群では，出血のため 5 例（4%）で開胸へ移行した．また，10 例（8%）で術後合併症（不整脈，気嚢遷延，乳糜胸，感染，出血，反回神経麻痺など）を認めた．30 日，90 日手術関連死亡は認めなかった．肺血管に関して術中所見と比較したところ，97.8%（309/316）が 3D-CT で描出されていた．描出されていなかった血管径は全例 2mm 以下のものであった．179 症例中，肺癌であった 165 症例を対象に臨床因子と術後合併症の関連について統計学的検討を行ったところ，3D-CT 施行群において，有意差はなかったものの術後合併症が低い傾向にあった（ $p=0.074$ ）．手術時間は 3D-CT 施行（ $p=0.021$ ）と出血量（ $p=0.005$ ）において有意に低下させる結果を示した．この研究では 3D-CT を実施する患者選定のバイアスが術後合併症や手術時間に影響を及ぼした可能性は否定できない．レトロスペクティブの検討での限界があるものの，3D-CT を使用した術前シミュレーションは，胸腔鏡肺切除において安全にそして効率的なパフォーマンスに有益であると結論している⁴⁵．

撮像機器の発達は現在も進行しており，脳神経血管領域⁴⁶，腹部血管領域^{47, 48}，心血管系領域^{49, 50}では area detector CT（ADCT）として知られている．320-detector row CT が 16 列 MDCT や 64 列 MDCT と比較して有用である報告が散見される．呼吸器外科領域では肺区域切除術前肺血管の評価を ADCT と 64 列 MDCT を比較した検討が Tane らによって報告されている．この報告では 32 症例に対して，320 列，64 列 CT 両方で肺区域切除術前に 3D-CT を作成し，肺血管について視覚化をスコア化しその視覚化スコアと術中所見とを比較している．その結果，特に区域間静脈において ADCT で有意に有用であったとしている⁵¹．320-detector row CT を使用するメリットとして，一度に広範囲を撮影することが可能であることが第一に挙げられる．特に呼吸性変動や心血管系の拍動を伴う部位の撮影では，その影響を抑えることが可能と考える．

本研究における limitation として読影者が一人であり，その読影能についての評価が他者との比較ができていないこと，読影の再現性についての評価ができていないことが挙げられる．また，手術の安全性や精度の向上に対する 3D-CT の有用性を評価するためには，プロスペクティブな研究を必要とするが，3D-CT 作成は既に標準的な検査となっているため，それを施行しな

いことは倫理的に困難と思われる。

【総括および結論】

①本研究から得られた新知見と意義.

- ・ 3D-CT の描出精度を明らかにした. その結果術前シミュレーションとして満足するものであったが, 2mm 未満の血管は描出されていない可能性があり, 注意が必要である. また, 描出の欠損を補うためには通常 CT 水平断での確認も必要である.
- ・ 従来広く用いられている解剖献体に基づく分類・頻度を生体にて比較, 検証した. その集積結果は概ね同等であったが, 一部にはその頻度に差を認めた.
- ・ これまで分類されなかった肺動静脈の破格を追加して新分類を作成した. 3D-CT で術前シミュレーションを行うことにより, より安全な精度の高い手術に貢献するものと考えてる.

②今後の展開と課題.

本研究の結果として明らかにした 3D-CT による肺動静脈の区域解剖は, 今後のバーチャルリアリティーや 3D プリンターを用いた手術ナビゲーションや手術教育への応用が考えられる. その精度や手術の安全性と精度の向上への貢献度を前向き比較試験によって明らかにすることが課題である.

③結論

術前シミュレーションの手段として 3D-CT は有用なモダリティである. ただし, 描出限界と, 読影能にはラーニングカーブが存在し注意が必要である. 3D-CT の集計から作成した手術を視点とした肺区域解剖の分類は, 呼吸器外科手術に有用な情報をもたらす.

【謝辞】

本研究を行うにあたり，多大な助言を頂きました，北海道大学大学院医学
研究院循環器・呼吸器外科学教室教授 松居喜郎先生，北海道大学病院診療
教授 加賀基知三先生，北海道大学病院准教授 樋田泰浩先生，北海道大学
大学院医学研究院 消化器外科学教室 II 教授 平野聡先生に深謝致します．

【引用文献】

- 1 Suzuki, K., Watanabe, S., Mizusawa, J., Moriya, Y., Yoshino, I., Tsuboi, M., Mizutani, T., Nakamura, K., Tadam H., Asamura, H. & Japan Lung Cancer Surgical Study Group. Predictors of non-neoplastic lesions in lung tumours showing ground-glass opacity on thin-section computed tomography based on a multi-institutional prospective study. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* **21**, 218-223 (2015).
- 2 鈴木健司. 肺癌に対する縮小手術の Evidence - 瘢痕癌から歴史的な縮小手術の第三相試験まで -. *肺癌* **52**, 182-189 (2012).
- 3 Kaseda, S., Aoki, T. & Hangai, N. Video-assisted thoracic surgery (VATS) lobectomy: the Japanese experience. *Semin Thorac Cardiovasc Surg.* **10**, 300-304 (1998).
- 4 Jackson, C. L. & Huber, J. F. Correlated applied anatomy of the bronchial trees and lung with system of nomenclature. *Dis Chest* **9**, 319-326 (1943).
- 5 Boyden, E. A. The intrahilar and related segmental anatomy of the lung. *Surgery* **18**, 706-731 (1945).
- 6 山下英秋. 気管支分岐並に肺区域の研究 (50 例) . *結核予防会研究業績雑誌* **1** (1953).
- 7 荒井他憲司. & 塩沢正俊. in *肺切除術* 67-95 (朝倉書店, 東京, 1992).
- 8 Yamashita, H. in *Roentgenologic anatomy of the lung* 70-107 (Igaku-shoin, Tokyo, 1978).
- 9 Hayashi, N., Kurimoto, M., Hirashima, Y., Kikeda, H. Shibata, T., Tmita, T. & Endo, S. Efficacy of Navigation in Skull Base Surgery Using Composite Computer Graphics of Magnetic Resonance and Computed Tomography Images. *Neurol Med Chir* **41**, 335-339 (2001).
- 10 Shiraisi, I., Yamagishi, M., Iwasaki, N., Toiyama, K. & Hamaoka, K. Helical Computed Tomographic Angiography in Obstructed Total Anomalous Pulmonary Venous Drainage. *Ann Thorac Surg* **71**, 1690-1692 (2001).
- 11 Raptopoulos, V. & Boiselle, P. M. Multi-detector row spiral CT pulmonary angiography: comparison with single-detector row spiral CT. *Radiology* **221**, 606-6013 (2001).
- 12 Watanabe, S., Arai, K., Watanabe, T., Koda, W. & Urayama, H. Use of three-dimensional computed tomographic angiography of pulmonary vessels for lung resections. *Ann Thorac Surg* **75**, 388-392 (2003).

- 13 Wunderlich, H., Reichelt, O., Schubert, R., Zermann, D. H. & Schubert, J. Preoperative simulation of partial nephrectomy with three-dimensional computed tomography. *BJU International* **86**, 777-781 (2000).
- 14 Lee, S. W. *et al.* Preoperative simulation of vascular anatomy by three-dimensional computed tomography imaging in laparoscopic gastric cancer surgery. *J Am Coll Surg* **197**, 927-936 (2003).
- 15 田中俊樹., 郷良秀典., 古川昭一. & 濱野公一. 肺癌手術における肺動静脈 3D-CT の有用性. *日呼外会誌* **19**, 8-11 (2004).
- 16 Akiba, T., Marushima, H., Harada, J., Kobayashi, S. & Morikawa, T. Importance of preoperative imaging with 64-row three-dimensional multidetector computed tomography for safer video-assisted thoracic surgery in lung cancer. *Surg Today* **39**, 844-847 (2009).
- 17 荒井他憲司. *3D-CG で学ぶ肺区域解剖*. (アトムス, 2008).
- 18 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).
- 19 Shikata, H., McLennan, G., Hoffman, E. A. & Sonka, M. Segmentation of Pulmonary Vascular Trees from Thoracic 3D CT Images. *Int J Biomed Imaging* **2009**, (2009).
- 20 Gyftopoulos, S., Hasan, S., Bencardino, J., Mayo, J., Nayyar, S., Badd, J. & Jazrawi, L. Diagnostic Accuracy of MRI in the Measurement of Glenoid Bone Loss *American Journal of Roentgenology* **199**, 873-878 (2012).
- 21 Ewart, W. in *The Bronchi and Pulmonary Blood Vessels*. (Tindall & Cox, London, 1889).
- 22 Thomas, W. S., Joseph, L., Carolyn, E. R. & Richard, H. F. in *General Thoracic Surgery* Vol. 1 (ed W. Shields. Thomas) 71-85 (Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2009).
- 23 Oizumi, H., Kanauchi, N., Kato, H., Endoh, M., Suzuki, J., Fukaya, K. & Sadahiro, M. Anatomic thoracoscopic pulmonary segmentectomy under 3-dimensional multidetector computed tomography simulation: a report of 52 consecutive cases. *J Thorac Cardiovasc Surg* **141**, 678-682 (2011).
- 24 BOYDEN, E. A. A Critique of the International Nomenclature on Bronchopulmonary Segments. *Dis Chest* **23**, 266-269 (1953).

- 25 Sivrikoz, M.C.& Tulay, C.M. Variations of lobar branches of pulmonary arteries in thoracic surgery patients. *Surg Radiol Anat.* **33**, 509-514 (2011).
- 26 Subotich, D., Mandarich, D., Milisavljevich, M., Filipovich, B. & Nikolich. V. Variations of Pulmonary Vessels: Some practical implications for lung resections. *Clinical Anatomy* **22**, 698-705 (2009).
- 27 Sonoda, D., Mikubo, M., Shiomi, K. & Satoh, Y. Abnormal branching of the left lingular pulmonary artery diagnosed by three-dimensional computed tomographic angiography in a patient with lung cancer: a case report. *J Cardiothorac Surg* **11**, 17 (2016).
- 28 Gokhan Arslan, Elvan Dincer, Adnan Kabaalioglu & Can Ozkaynak. Right top pulmonary vein: Evaluation with 64 section multidetector computed tomography. *European Journal of Radiology* **67**, 300-303 (2008).
- 29 Marom, E.M., Herndon, J.E., Kim, Y.H. & McAdams, H.P. Variations in Pulmonary Venous Drainage to the Left Atrium: Implications for Radofrequency Ablation. *Radiology* **230**, 824-829 (2004).
- 30 Cronin, P., Kelly, A.M., Desjardins, B., Patel, S., Gross, B.H., Kazerooni, E.A., Morady, F., Oral, H. & Carlos, R.C. Normative Analysis of Pulmonary Vein Drainage Patterns on Multidetector CT with Measurements of Pulmonary Vein Ostial Diameter and Distance to First Bifurcation. *Academic Radiology* **14**, 178-188 (2007).
- 31 Akiba, T., Marushima, H., Harada, J., Kobayashi, S. & Morikawa, T. Anomalous pulmonary vein detected using three-dimensional computed tomography in a patient with lung cancer undergoing thoracoscopic lobectomy. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* **56**, 413-416 (2008).
- 32 Akiba, T. *et al.* Pulmonary vein analysis using three-dimensional computed tomography angiography for thoracic surgery. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* **58**, 331-335 (2010).
- 33 Aragaki, M., Iimura, Y., Yoshida, Y. & Hasegawa, N. Anomalous V(2) of the left pulmonary vein detected using three-dimensional computed tomography in a patient with lung cancer: A case report. *Int J Surg Case Rep* **37**, 208-210 (2017).

- 34 Fourdrain, A., De Dominicis, M., Bensussan, M., Iquille, J., Lafitte, S., Michel, D. & Berna, P. Three-dimensional computed tomography angiography of the pulmonary veins and their anatomical variations: involvement in video-assisted thoracoscopic surgery-lobectomy for lung cancer. *Folia Morphol (Warsz)* **76**, 388-393 (2017).
- 35 Matsumoto, I., Ohta, Y., Tsunozuka, Y., Sawa, S., Fujii, S., Saito, K., Oda, M. & Watanabe, G. A Surgical case of lung cancer in a patient with the left superior and inferior pulmonary vein forming a common trunk. *Ann Thorac Cardiovasc Surg* **11**, 316-319 (2005).
- 36 福原光朗., 木下裕康., 飯島慶仁., 中島由貴., 鈴木弘行. & 浦本秀隆. 術前に指摘し得た部分肺静脈還流異常合併肺癌の1切除例. *日呼外会誌* **30**, 514-518 (2016).
- 37 Kobayashi, M., Morishita, S., Okabayashi, T., Miyatake, K., Okamoto, K., Namikawa, T., Ogawa, Y. & Araki, K. Preoperative assessment of vascular anatomy of inferior mesenteric artery by volume-rendered 3D-CT for laparoscopic lymph node dissection with left colic artery preservation in lower sigmoid and rectal cancer. *World J Gastroenterol* **12**, 553-555 (2006).
- 38 Yamashita, K. & Shimizu, K. Video-assisted breast surgery and sentinel lymph node biopsy guided by three-dimensional computed tomographic lymphography. *Surgical Endoscopy* **22**, 809-809 (2007).
- 39 Ohtaki, Y. & Shimizu, K. Anatomical thoracoscopic segmentectomy for lung cancer. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* **62**, 586-593 (2014).
- 40 Shimizu, K., Nakano, T., Kamiyoshihara, M. & Takeyoshi, I. Segmentectomy guided by three-dimensional computed tomography angiography and bronchography. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* **15**, 194-196 (2012).
- 41 清水公裕. in 第22回日本呼吸器外科セミナー (ed 日本呼吸器外科学会) (京都, 2016).
- 42 Akiba, T., Marushima, H., Takagi, M., Odaka, J., Kobayashi, S. & Morikawa, T. Preoperative evaluation of a tracheal bronchus by three-dimensional 64-row multidetector-row computed tomography (MDCT) bronchography and angiography: report of a case. *Surg Today* **38**, 841-843 (2008).
- 43 Shimizu, K., Nakazawa, S., Nagashima, T., Kuwano, H. & Mogi, A. 3D-CT anatomy for VATS segmentectomy. *Journal of Visualized Surgery* **3**, 88-88 (2017).

- 44 Iwano, S. Planning video-assisted thoracic surgery segmentectomy using three dimensional computed tomography angiography and bronchography with a virtual safety margin. *J Vis Surg* **3**, 82 (2017).
- 45 Hagiwara, M., Shimada, Y., Kato, Y., Nawa, K., Makino, Y., Furumoto, H., Akata, S., Kakihana, M., Kajiwar, N., Ohira, T., Saji, H. & Ikeda, N. High-quality 3-dimensional image simulation for pulmonary lobectomy and segmentectomy: results of preoperative assessment of pulmonary vessels and short-term surgical outcomes in consecutive patients undergoing video-assisted thoracic surgery. *Eur J Cardiothorac Surg* **46**, e120-126 (2014).
- 46 Siebert, E., Bohner, G. Dewey, M., Masuhr, F., Hoffmann, K.T., Mews, J., Engelken, F., Bauknecht, H.C., Diekmann, S. & Kingebiel, R. 320-slice CT neuroimaging: initial clinical experience and image quality evaluation. *Br J Radiol* **82**, 561-570 (2009).
- 47 Sugihara, R., Kitajima, K., Maeda, T., Yoshikawa, T., Konishi, M., Kanata, N., Kanda, T., Koyama, H., Takenaka, D., Ohno, Y. & Sugimura, K. Comparison of capability of abdominal 320-detector row CT and of 16-detector row CT for small vasculature assessment. *Kobe J Med Sci* **56**, E154-161 (2011).
- 48 Kitajima, K., Maeda, T., Ohno, Y., Yoshikawa, T., Konishi, M., Kanda, T., Onishi, Y., Matsumoto, K., Koyama, H., Takenaka, D. & Sugimura, K. Capability of abdominal 320-detector row CT for small vasculature assessment compared with that of 64-detector row CT. *Eur J Radiol.* **80**, 219-223 (2011).
- 49 Rybicki, F. J., Otero, H.J., Steigner, M.L., Vorobiof, G., Nallamshetty, L., Mitsouras, D., Ersoy, H., Mather, R.T., Judy, P.F., Cal, T., Coyner, K., Schultz, K., Whitmore, A.G. & Di Carli, M.F. Initial evaluation of coronary images from 320-detector row computed tomography. *Int J Cardiovasc Imaging* **24**, 535-546 (2008).
- 50 Steigner, M. L., Otero, H.J., cai, T., Mitsouras, D., Nallamshetty, A.G., Ersoy, H., Levit, N.A., Di Caerli, M.F. & Rybicki, F.J. Narrowing the phase window width in prospectively ECG-gated single heart beat 320-detector row coronary CT angiography. *Int J Cardiovasc Imaging* **25**, 85-90 (2009).

- 51 Tane, S., Ohno, Y., Hokka, D., Ogawa, H., Tauchi, S., Nishio, W., Yoshimura, M., Okita, Y. & Maniwa, Y. The efficacy of 320-detector row computed tomography for the assessment of preoperative pulmonary vasculature of candidates for pulmonary segmentectomy. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* **17** (2013).