

Dual MDCTの4次元データによる血管壁の組成と力学的負荷の解析：Multi-detector row CTによる血管構造の3・4次元解剖学的形態の検討および臓器血流パーフュージョン解析



高橋 昭喜*, 高瀬 圭, 森田 佳明, 松浦 智徳

医学系研究科 医科学専攻 病態制御学講座
量子診断学分野 教授
E-mail: t-shoki@rad.med.tohoku.ac.jp

1. はじめに

CT, MRI による高分解能の3次元画像と心電同期を組み合わせた精細な4次元データにより我々は多数例の血管疾患を診療, 解析してきたが, 本年から80kv, 140kvの直交する2X線源が同時使用可能な新しいMDCTが臨床使用可能となり, 血管壁病変組成の組織学的な認識も同時に可能となった. 我々は多数例の血管疾患を診療, 解析してきたが, Dual Energy MDCTさらには3T(テスラ)MRIといった新しい生体バイオナノイメージングデバイスにより血管のさらに詳細な3・4次元解析, さらには機能解析が可能になる.

本稿では, 我々の行っているMDCTによる血管解析として, 副腎静脈の同定法, 食道癌術前3次元血管シミュレーション画像, Dual Energy MDCTによる大動脈解析, 肺血流パーフュージョン解析に関する研究を紹介する.

研究1. Multi-detector row CTによる右副腎静脈の描出, 解剖学的形態の検討

2.1 はじめに

原発性アルドステロン症はアルドステロンの過剰分泌により引き起こされるが, 過剰分泌の局在診断には副腎静脈サンプリングが必要不可欠である. サンプリングに際しては, MDCT (multi-detector row computed tomography: 多列検出器コンピュータ断層撮影法)を行うことで, 右副腎静脈の解剖学的形態に関する有用な情報を得ることが出来る. そこで, MDCTを用いた右副腎静脈の描出能を検討し, さらに描出された副腎静脈について三次元的な解剖学的形態を詳細に検討した.

2.1 対象と方法

造影MDCTを施行した104症例を対象に検討を行った. 8列MDCTを用い, 0.5秒/1回転, ビームコリメーション幅1mm, テーブル移動距離14mm/秒の条件で, 300mg/mlの造影剤100mlを3.5ml/秒の速度で注入後, 撮像した. 1mm厚, 0.5mm間隔でCT画像再構成を行った. 右副腎静脈の描出の程度, 右副腎静脈と副肝静脈やその他の静脈との共通幹の有無, 下大静脈に合流する場合については, 右副腎静脈開口部の位置(椎体を基準とした頭尾方向の位置, 椎体右縁からの水平方向の距離, 右腎静脈開口部下端からの頭尾方向の距離, 下大静脈壁での位置), 下大静脈分岐部からの右副腎静脈の向き(横断面上での向き, 垂直断面上での向き), 長さや太さといった解剖学的形態について検討した.

2.2 結果

右副腎静脈は104例中79例(76%)で同定可能であり(図1), 右副腎静脈と副肝静脈が共通幹を形成する症例が79例中6例, 右副腎静脈が下大静脈に直接合流するが副肝静脈もほとんど同じ位置に合流していた症例が7あった. 下大静脈に直接合流する73例で以下の結果が得られた. 開口部の頭尾方向の位置は第11胸椎から第1腰椎の高さにあり, とくに第12胸椎中1/3から第1腰椎上1/3の高さが69%と多かった(図2). 椎体右縁からの水平方向の距離は平均9.3mmであった. 右腎静脈開口部下端からの距離は平均48mm頭側であった. 右副腎静脈は97%で下大静脈右背側壁に, 残り3%で下大静脈左背側壁に合流していた. 右副腎静脈の下大静脈分岐部からの向きは, 横断面では右背側方向が77%,

左背側方向が23%であり，垂直平面上では尾側方向が89%，頭側方向が11%であった (図3). 右副腎静脈の長さは，1.2～8.6mmで，平均3.8mm，下大静脈合流部での径は1.0～6.0mmで，平均1.7mmであった.

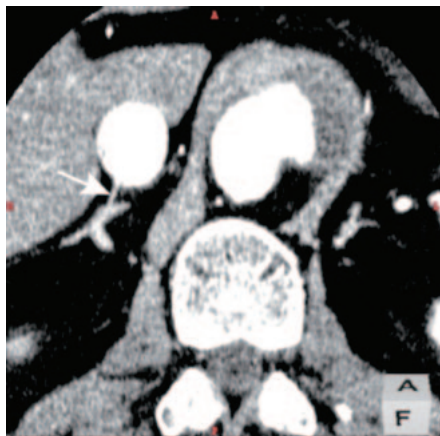


図1. A 56-year-old man with an aortic dissection. A para-axial multiplanar reconstruction (MPR) image shows excellent visualization of the right adrenal vein (RAV, arrow) running through the intervening adipose tissue to join the right posterior quadrant of the inferior vena cava. The length of the RAV was 8 mm.

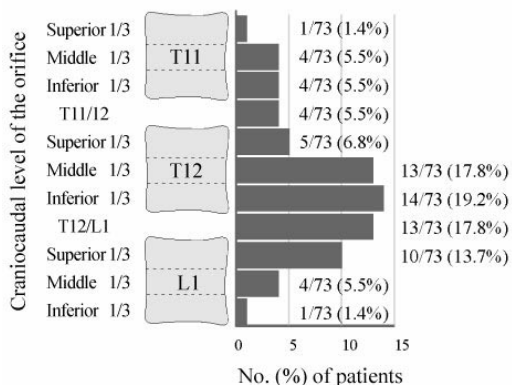


図2. The craniocaudal level of the right adrenal vein orifice in relation to the vertebrae. T11, T12 and L1 represent 11th and 12th thoracic and 1st lumbar vertebrae, respectively.

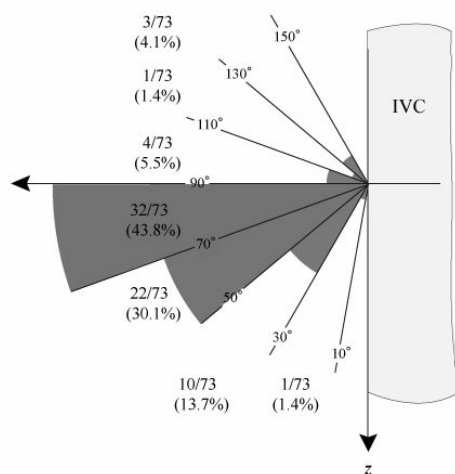


図3. The craniocaudal angle of the right adrenal vein with z-axis in the vertical plane. IVC = inferior vena cava.

3. コメントと結論

これまで右副腎静脈の描出に関する断片的な報告はあるが系統的に分析したものはない. 本検討では，多くの症例で MDCT での右副腎静脈の同定が可能であり，かつ三次元的な解剖学的形態評価が可能であることが示唆された. 本研究の結果から，MDCT で術前に右副腎静脈の解剖的情報を得ておくことは，副腎腫瘍の治療前にしばしば必要とされる副腎静脈サンプリングの成功率を高め，さらにより安全かつ迅速・正確に行う点において有用性があると期待される.

4. 展望

ごく最近 80kv, 140kv の直交する 2X 線源が同時使用可能な新しい MDCT が臨床使用可能となり，血管壁病変組成の組織学的な認識も同時に可能となった. 今後は，4次元画像データによる血管壁への力学的負荷の計測と血管壁組成の情報を同時解析することにより，血管病変の進行，治療後再発のメカニズムを探り，増加の一途をたどる血管疾患の早期診断，治療へむけてのより鋭敏な非侵襲的診断法，低侵襲血管内治療法の確立を目指していきたい.

研究 2. MDCT と 3次元マルチオブジェクト解析装置による食道癌術前3次元血管シミュレーション

3.1 はじめに

胸腔鏡下食道癌手術は低侵襲手術として、1990年代より普及している[1-4]。従来の開胸術と予後はほぼ同等との報告もあり[3,4]、現在当院では胸腔鏡下手術が標準術式となっている。

胸腔鏡下手術の利点としては、低侵襲による術後 QOL 向上の他に、拡大視効果による縦隔の細かな構造（気管支動脈、胸管、迷走神経など）の同定能の向上が挙げられる。一方、欠点として、触覚や遠近感がないため、3次元的なイメージや術野全体の把握が難しく、解剖学的誤認による血管や臓器の損傷のおそれがある。そのため、術前に血管や周囲臓器などの立体的位置関係を把握することができれば、術操作の安全性を向上できると期待される。

特に、気管支動脈は損傷すると喀痰排泄能低下や気管壊死/虚血といった呼吸器系の合併症を有意に増加させるので、その温存が強く望まれる[5]。気管支動脈の起始レベルは、大動脈のT h5 もしくは 6 レベル、あるいは前後像で大動脈が主気管支と交叉する直上が多く、また気管支動脈の分岐パターンは、右は気管支助間動脈幹、左は大動脈からの直接起始が一般的とされている。しかし、解剖学的報告によるとその数、起始レベル、分岐パターン、走行などには variation が多い[6,7]。そのため、気管支動脈の解剖を把握しておくことは、術前情報として重要である。

最近、Multi-detector row CT (MDCT) および Workstation の進歩により、正確で良好な画質の 3D 画像を作成することが可能になってきており、CT angiography を含めた術前 3D simulation が各種領域において利用されてきている[8-10]。特に内視鏡下の手術では、この手術 simulation の必要性が高く、腹腔鏡などへの応用の報告がされてきている。しかし、我々の調べた範囲では、胸腔鏡下手術の術前 3D simulation は未だ報告されていない。

また MDCT による薄いスライス厚での撮像では、かつて困難とされてきた正常気管支動脈の CT による描出も向上したとの報告もされた[11]が、胸腔鏡下手術の術前 3D simulation における気管支動脈の詳細な画像解剖の検討はなされていない。

胸腔鏡下食道癌術前に、術前 simulation として MDCT を用いて術視野に合わせて縦隔の血管や周囲構造の 3D 画像を作成してその有用性を検討し、特に気管支動脈についてはその描出能と解剖学的変異について検討する。

3.2 対象と方法

胸腔鏡下食道癌手術の適応とされた 73 例（男性 63 例，女性 10 例，平均年齢 64.7 歳：41～78 歳）に対して、術前に MDCT による dynamic CT を施行した。

胸腔鏡もしくは開胸術の既往を有する症例はなかった。22 例では、術前に放射線化学療法が施行されており、これらの症例は腫瘍残存もしくは再発により手術が予定された。今回の simulation では、我々は縦隔内の構造を以下の 8 つの volume に分けて作成した（図 4）。

- 心臓，大血管（大動脈とその分枝，大静脈，腕頭静脈～鎖骨下静脈，肺動静脈）
- 右気管支動脈
- 左気管支動脈
- 奇静脈
- 骨
- 気管気管支，肺
- 食道（腫瘍を含めた）
- 腫大リンパ節

このうち、a) d) e) は静脈相から、b) c) f) g) h) は動脈相を用いて作成した。

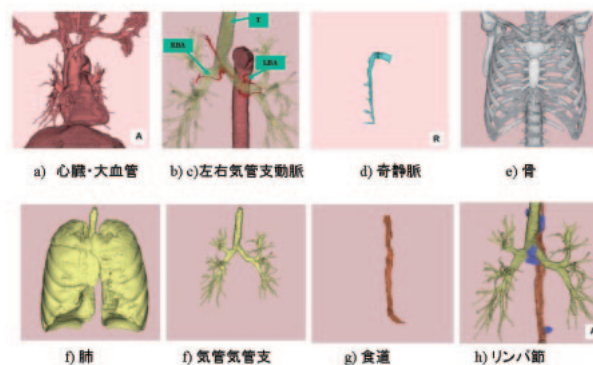


図 4. Multivolume image

1. 3D-CT angiography

3D-CT angiography はCT値の域値を設定し、それをもとに対象となる血管のみを抽出する。また、

細い枝など閾値のみで作成が困難な場合については、フリーライン（用手的に目標の構造物を囲んで抽出する方法）や 3D 画像上での部分的な加工を行うことで完成させた。3D-CT angiography の構成要素としては以下のものがある。特に、手術の際に重要となる奇静脈や気管支動脈を別の volume としている。

- a) 心臓，大血管（大動脈とその分枝，大静脈，腕頭静脈～鎖骨下静脈，肺動静脈）
- b) 右気管支動脈
- c) 左気管支動脈
- d) 奇静脈

なお，胸腔鏡下手術の場合，分離肺換気により右肺は虚脱していることから，3D 画像上も右肺動静脈は肺門から遠位で除去して表示させた。

2. 縦隔内構造の 3D 画像

縦隔内の構造としては，以下の volume を作成した。

- e) 骨
- f) 気管気管支，肺
- g) 食道（腫瘍を含めた）
- h) 腫大リンパ節

骨，肺～気管気管支は血管と同様に CT 値の域値を決定することで，volume を作成した。食道や腫大リンパ節は軟部組織であり，CT 値設定による抽出は困難であり，上述のフリーラインにて 3D 画像を作成した。また，上述の肺動静脈と同様の理由で，右気管支も肺門から遠位は除去して表示させた。

3. Fused 3D simulation images (図 5)

上記のように作成した 8 個の volume を，相対的位置関係がわかるように合成画像を作成し，実際の simulation 画像として利用した。Simulation 画像は実際の術視野に合わせて，仰臥位で頭側が画面の左側に向かうような方向にし，縦隔内を右側面から観察するように設定した。

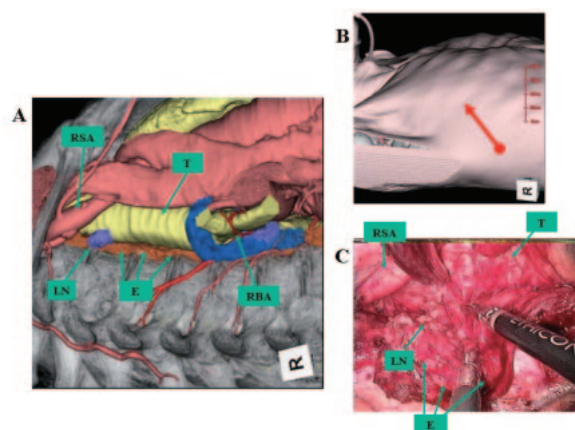


図 5. Fused 3D simulation image

右胸腔内の内視鏡から観察した像を Simulation し，術中と同様の画像が CT にて作成できている。

Virtual endoscopy による観察

術前に，放射線科医と外科医が，作成された 3D simulation 画像を確認し，それぞれ縦隔内血管や構造の同定および評価を行った。

画像の観察方法としては，Workstation に搭載されている virtual endoscopy mode を利用した。これは，実際の内視鏡のように対象の内腔を視点や視野角を変えながら観察する方法で，日常的には気管支鏡や消化管内視鏡などの仮想操作として用いられる。今回，我々はこの操作法を用いて，実際の手術視野と同じように観察することによって内視鏡下手術の術前 simulation を行った。

実際の観察手順を以下に示す。

1) 仮想内視鏡の胸腔内への挿入

実際の手術に準じて，仮想内視鏡の視点を右中腋窩線レベルの第 4 肋間から胸腔内に挿入する。

2) 上縦隔レベルの観察

上縦隔レベルでは，以下の構造の観察を行った。

- ・ 上部食道
- ・ 気管（気管憩室の有無を含めて）
- ・ 腫大リンパ節（傍気管，傍上部食道）
- ・ 血管（腕頭～鎖骨下動静脈，上大静脈）
- ・ 骨

気管憩室は，上縦隔レベルでまれに観察される構造として知られており [12]，この憩室の有無に関しても評価し，それが同定された場合は，simulation 画像に反映させた。

3) 気管分岐部レベルの観察

気管分岐部レベルでは，以下の構造の観察を行った。

- ・ 中部食道
- ・ 気管分岐～主気管支
- ・ 腫大リンパ節（気管分岐下，主気管支）
- ・ 胸部大動脈
- ・ 両側気管支動脈
- ・ 奇静脈
- ・ 骨

4) 下部食道レベルの観察

下部食道レベルでは，以下の構造の観察を行った．

- ・ 下部食道
- ・ 腫大リンパ節（傍食道，後縦隔）
- ・ 胸部大動脈，心臓，下大静脈
- ・ 骨

virtual endoscopy にて観察された simulation 画像は，動画ファイルおよびいくつかのキー画像として保存され，外科医に手渡された．

気管支動脈の描出と解剖に関する検討

今回の 3D simulation では，特に気管支動脈の描出や解剖について注目して検討した．検討項目は以下のとおり．

- ・ 気管支動脈の本数
- ・ 気管支動脈のサイズ
起始部直後の径を測定した．
- ・ 大動脈からの起始レベル

Martine Remy-Jardin らの報告[13]にならって，以下のように分類した．

- Th5, 6 レベルを common type
- それ以外を ectopic type : 大動脈弓，Th6 より下方の下行大動脈，鎖骨下動脈から起始する気管支動脈．

- ・ 気管支動脈の分岐パターン
 - 大動脈から直接起始
 - 気管支肋間動脈幹から起始
 - 左右共通幹
 - 鎖骨下動脈から起始
- ・ 大動脈開口部の位置

Martine Remy-Jardin らの報告[13]にならって，大動脈開口部の位置を 8 つに分けて分類した．実際の検討では，開口部が anteromedial - medial - posteromedial のものを内側開口群，anterior -

anterolateral - lateral のものを前外側開口群とした．

- ・ 縦隔内の走行

気管支動脈の走行に関して，食道および気管との関係を，分岐パターンに分けて検討した．

- 食道との関係としては，気管支動脈近位部と食道との関係から，食道の右側走行／左側走行に分類．
- 気管との関係としては，気管の背側走行／腹側走行に分類．

3.3 結果

3D-simulation 作成

全例において問題なく Dynamic CT が施行され，良好な動脈相・静脈相の画像がえられた．その元画像をもとに，縦隔内の各血管や臓器に関して 3D 画像を作成し，それらを fusion させた simulation 画像が完成できた．術前 simulation で構築した血管や食道，気管，リンパ節などの走行・位置関係は，術所見と良好に一致しており，全例において術中 navigation として極めて有用であったとの術者の評価が得られた．

3D-simulation 画像の virtual endoscopy による観察

3D simulation 画像を観察するとき，実際に手術で切除/切離される食道や腫大リンパ節，奇静脈といった構造は，simulation 画像上でも同様にその volume だけを除去することで，実際の切除後の途中経過に近い観察が可能であった．また，特定の volume の透過性を変化させることにより，観察対象となるような構造を見やすくすることも可能であった．一例としては，気管左側にある腫大リンパ節は，実際の術視野上は気管の裏側に存在しており，観察が困難であるが，3D simulation 画像上で気管の volume の透過性をあげる（薄くすることによって，そのリンパ節の観察を容易にすることができた．

上縦隔レベルでは，主な観察点としては，上部食道と周囲縦隔臓器との関係，腫大リンパ節の位置関係，血管・気管の変異や蛇行の有無，骨棘などの骨変形の有無があり，それらを認識しておくことは上部食道や傍気管リンパ節の処理の際に有

用であった。気管憩室は、4例において確認された。確認された憩室は simulation 画像に反映され、誤切除の予防として有用であった。

気管分岐部レベルでは、まず奇静脈の同定がなされたが、全例で奇静脈の良好な3D画像作成が可能であった。奇静脈は、手術の際に最初に剥離・切離される血管であり、simulationでもその解剖を観察した後に画像から除去された。

また、このレベルでは、左右の気管支動脈の同定がなされたが、これはこの simulation において最も重要な事項である。解剖学的な評価については、別項に詳細を述べる。左気管支動脈は、術視野においては奥に存在するため、大動脈や主気管支、食道などを必要に応じて、除去したり透明度を変更したりして観察した。

下縦隔レベルでは、主な観察点としては、下部食道と周囲縦隔臓器との関係、腫大リンパ節の位置関係、血管の変異や蛇行の有無、骨棘などの骨変形の有無などを評価したが、下部食道や傍気管リンパ節の処理の際の simulation として有用であった。

気管支動脈の描出と解剖

・ 気管支動脈の描出

73例で、185本の気管支動脈が同定され、1例平均で2.53本の同定であった。右気管支動脈(単独)は80本(1例平均1.09本)、左気管支動脈(単独)は67本(1例平均0.91本)、左右共通幹は38本(1例平均0.52本)同定された。

右気管支動脈は、左右共通幹から起始する右枝38本を含めた、118本(1例平均1.61本)、左気管支動脈は、左右共通幹から起始する左枝38本を含めた、105本(1例平均1.43本)であった。

症例ごとでまとめると、右気管支動脈は73例中全例で存在が確認され、左気管支動脈は73例中72例で確認されたが、1例ではその存在を確認できなかった。

・ 気管支動脈のサイズ

気管支動脈のサイズは全体で1.04mmから4.03mm、平均1.98mmであった。右気管支動脈(単独)は1.13mmから3.42mm、平均2.05mm、左気管支動脈(単独)は1.04mmから2.70mm、平均1.69mmで、右気管支動脈のほうが太い傾向にあった。左右共通幹は1.38mmから4.03mm、平均2.37mmで左右単

独の気管支動脈よりも太い傾向にあり、右枝の平均は1.91mm、左枝の平均は1.70mmであった。

・ 大動脈からの起始レベル

Th5,6レベルの大動脈から起始する気管支動脈(common type)は、148本/185本(80%)であった。そのうち、右気管支動脈は68/80本(85%)、左気管支動脈50/67本(74%)、左右共通幹30/38本(79%)であった。

Th5,6レベルより上方もしくは下方の胸部大動脈および鎖骨下動脈からの分岐するものはectopic typeと呼ばれているが、左気管支動脈がやや多い傾向が認められた。Th5より上方の大動脈(多くは大動脈弓)から起始する気管支動脈は、22/185本あり、そのうち、右気管支動脈は8/80本(10%)、左気管支動脈8/67本(12%)、左右共通幹6/38本(8%)であった。

Th6より下方の大動脈から起始する気管支動脈は、11/185本あり、そのうち、左気管支動脈9/67本(13%)、左右共通幹2/38本(5%)であり、右気管支動脈ではこの起始レベルのものはみられなかった。鎖骨下動脈から起始する気管支動脈は、4/185本あり、いずれも右気管支動脈4/80本(5%)であった。

・ 右気管支動脈の解剖

1. 右気管支動脈の分岐パターン

右気管支動脈の分岐パターンは以下の4通りであった。①気管支肋間動脈幹61/118本(52%)、②大動脈単独分岐15/118本(13%)、③右鎖骨下動脈4/118本(3%)、④左右共通幹38/116本(33%)。

気管支肋間動脈幹は60/61本が右側で、1例のみが左側であった。また、症例ごとでみると、気管支肋間動脈幹由来の右気管支動脈は61/73例でみられ、全体の症例の84%で確認された。

2. 右気管支動脈の大動脈開口部

大動脈開口部の位置は分岐パターンによって異なっており、気管支肋間動脈幹、直接起始、左右共通幹に関して、大動脈開口部は以下のような結果であった。

気管支肋間動脈幹では、全例(61/61本)において、内側方向(anteromedial - medial - posteromedial)からの開口であり、前外側方向(anterior - anterolateral - lateral)の開口のものはみられなかった。

一方で、大動脈直接起始では、内側方向が9/15本(60%)、前外側方向が6/15本(40%)であり、左

右共通幹では、内側方向が 10/38 本(26%)、前外側方向が 28/38 本 (74%) であった。

3. 右気管支動脈の縦隔内の走行（食道と気管との関係）

縦隔内の走行に関しては分岐パターンによって異なっており、気管支肋間動脈幹起始、直接起始、左右共通幹起始に関して、縦隔内の走行は以下のような結果であった。

気管支肋間動脈幹起始では、全例(61/61 本)において、食道右側、食道・気管背側の走行であった。

一方、大動脈直接起始の場合、食道右側走行は 3/15 例 (20%)、食道左側走行は 12/15 例(80%)であった。食道右側走行の 3 例は全例、食道・気管背側を走行していた。一方、食道左側走行の 12 例では、気管背側・食道腹側の走行が 5 例(33%)、気管腹側走行が 7 例(47%)で認められた。なお、大動脈直接起始で食道右側を走行する気管支動脈に、気管支肋間動脈幹由来の右気管支動脈が併存することはなかった。一方、食道左側走行の右気管支動脈の症例では、全例で気管支肋間動脈幹が存在しており、2本目の右気管支動脈として存在していた。

また、食道右側走行の大動脈直接起始右気管支動脈は、全例において大動脈内側方向からの開口であり、食道左側走行の大動脈直接起始右気管支動脈は、前外側方向からの開口が 50%でみられた。

左右共通幹起始は全例(38/38 本)で食道左側の走行であった。このうち、気管背側・食道腹側の走行が 17 例(45%)、気管腹側走行が 21 例(55%)で認められた。

・ 左気管支動脈の解剖

1. 左気管支動脈の分岐パターン

左気管支動脈の分岐パターンは以下の 3 通りであった。①気管支肋間動脈幹起始 4/104 本(4%)、②大動脈直接起始 63/104 本(61%)、③左右共通幹起始 38/105 本(36%)。

気管支肋間動脈幹は 4 本とも左気管支動脈と右肋間動脈との共通幹であった。

2. 左気管支動脈の大動脈開口部

気管支肋間動脈幹、直接起始に関して、大動脈開口部は以下のような結果であった。

気管支肋間動脈幹では、全例(4/4 本)において、内側方向からの開口であり、前外側方向の開口のものはみられなかった。

一方で、大動脈直接起始では、内側方向が 17/63 本(27%)、前外側方向が 46/63 本 (73%) であった。

左右共通幹は、前述（右気管支動脈の項）のとおり。

3. 左気管支動脈の縦隔内の走行（食道と気管との関係）

気管支肋間動脈幹、直接起始ともに、全例(67/67 本)において、食道左側、気管背側の走行であった。

左右共通幹は、前述（右気管支動脈の項）のとおり。

手術所見との対比

気管支動脈は、手術で合計 142 本同定され、右気管支動脈が 78 本、左気管支動脈が 35 本、左右共通幹 29 本であった。

右気管支動脈のうち、CT で同定された気管支肋間動脈幹由来の 61 本と食道右側を走行する大動脈直接起始 3 本は全部手術で同定された。この他、術前CTで同定できなかったが、気管支肋間動脈幹から分岐する右気管支動脈 6 本が手術では同定された。ただし、この 6 本はいずれも非常に細い枝であった。

CT で同定されたもののうち、食道左側を走行する右気管支動脈は 5/12 本、右鎖骨下動脈から分岐する右気管支動脈は 3/4 本、左気管支動脈は 35/67 本、左右共通幹は 29/38 本が手術で同定された。食道左側を走行する右気管支動脈や左気管支動脈は術視野外もしくは周囲との癒着などで手術では同定困難なものが全部で 49 本あり、これらは術前CTのみでの同定であった。手術で同定された食道左側を走行する気管支動脈は、左右を問わず全例CTで同定可能であった。

72/73 例が胸腔鏡下で手術が完遂された。1 例は左気管支動脈の損傷による出血があり、開胸に移行された。

術後の気管壊死は 4 例において発生した。このうち 3 例は、上述の開胸に移行した 1 例を含めて左右の気管支動脈が温存できなかった症例であった。1 例では左右の気管支動脈が温存されたものの、気管壊死を発症した。

3.4 考察

・ 胸腔鏡下食道癌手術と術前 3D simulation

胸部食道癌に対する胸腔鏡下手術は、1992 年に Cuschieri らが初めて報告し [14]、本邦では Akaishi らが最初に報告した [2]。開胸術と比較し

て、予後はほぼ同等との報告もなされており[3,4], 現在当院では胸腔鏡下手術は食道癌手術の標準術式となっている。胸腔鏡下手術の利点としては、通常の内視鏡下手術と同様に体壁の損傷が少ないことによる低侵襲化があり、食道切除術においても開胸しないことによる疼痛の軽減や術後呼吸機能改善など患者の QOL 向上がある。また、他の利点として内視鏡利用による拡大視効果があり、それにより反回神経や気管支動脈といった細かい構造の同定能向上が挙げられる[4].

一方、欠点として、触覚や遠近感がないため、3次元的なイメージや術野全体を捉えることが難しく、解剖学的誤認による血管や臓器の損傷のおそれがある。特に、気管支動脈の損傷は喀痰排泄能低下や気管壊死/虚血といった呼吸器系の合併症の頻度を有意に高めるとの報告もあり、極力温存することが望ましいとされている[5]. そのため、術前に術視野にあわせた 3D-simulation を作成することにより、術操作の習熟や安全性の向上が期待される。現在まで、MDCT による手術 simulation は、腹腔鏡下胃癌手術[8], 腎癌部分切除術[9], 低侵襲開心術[10]などさまざまな手術の領域での報告がなされている。しかし、胸腔鏡下手術の術前 simulation に関しては、調べた範囲では今回が初めての報告である。

今回作成した 3D 画像は気管支動脈を含めた血管、食道、腫大リンパ節などの立体的位置関係を明瞭に描出し、virtual endoscopy 法を用いることで実際の手術手技に準じた観察が可能であった。術前 simulation の有用性としては、術操作のイメージトレーニング、ストレスなく安全で効率的な手技の施行、誤った臓器/血管損傷の予防などが挙げられる。

・ CT による気管支動脈の描出

CT による気管支動脈の描出に関しては、複数の報告がされている。

Mori は、肺癌患者において single helical CT を用いて dynamic 造影(3ml/sec, 造影剤注入後 20 秒後で撮影)を行い、5mm 厚画像による観察で、179/522 本(34%), 右 29.5%, 左 39.1%の同定率との結果であった[15]. また Murayama らは気管支動脈塞栓術もしくは気管支動脈内動注療法の施行前の患者で、Single helical CT を用いて dynamic 造影(2ml/sec, 造影剤注入後 30 秒後で撮影)を行い、2-3mm 厚画像による観察で、全体で 12/16 本(75%), 右気管支動脈は 87%, 左気管支動脈は 63%で同定

可能な結果であった[16]. 一方, Martine Remy-Jardin らは、喀血で気管支動脈塞栓術をうけた患者に対し、4 列もしくは 16 列 MDCT を用いて dynamic 造影(4ml/sec, bolus tracking 法)を行い、1mm 厚画像による観察で、全体で 50/55 本(91%), 右気管支動脈 84%, 左気管支動脈 96%で同定可能と報告している[13].

これらの報告から、MDCT による thin-slice 厚での撮像および Dynamic CT による動脈相の撮像が、気管支動脈の同定能を向上させることが示唆される。また過去の報告の大部分は、大部分が喀血や肺癌患者などを対象としたものであり、このような病的状態では気管支動脈は正常よりも拡張していることが多い。これに対して拡張のない正常気管支動脈は CT による描出は困難と考えられていたが、最近になり 16 列 MDCT を用いて 5mm 厚、0.7mm 間隔の MIP 画像 (maximum intensity projection, 最大値投影法)での観察により、右気管支動脈が 79%, 左気管支動脈が 90%と高率に同定可能であったとの報告もある[11]. しかし、胸腔鏡下手術の術前 3D simulation における気管支動脈の詳細な画像解剖の報告は未だなされていない。

今回の研究では胸腔鏡下手術の術前 3D simulation の食道癌症例を対象としたが、気管支動脈に関しては大部分の例で正常な気管支動脈であったと考えられる。それにも拘わらず、極めて良好な同定率で詳細な解剖の確認が可能であったが、これは、過去の報告よりもさらに薄いスライス厚(0.5mm 厚)での撮像を行い、Bolus tracking 法を用いて良好な動脈相をえることによって、気管支動脈の立体的な描出能が向上したためと考えられる。

正常者の気管支動脈の解剖が臨床的に問題になることはない。しかし、今回の食道癌手術を含めた縦隔リンパ節処理を伴う手術においては、気管支動脈の解剖を術前に把握しておくことは極めて重要となる。それによって術中の気管支動脈損傷からの不用意な出血や術後呼吸器合併症を予防することに役立つと考えられる。また、いくつかの論文で報告されているように、喀血に対する気管支動脈塞栓術の場合も、手技前に血管解剖に関する情報を得ることによって、効率的な手技、成功率の向上が期待される[13,16].

・ 気管支動脈の分岐や走行の解剖学的な検討との比較

気管支動脈の解剖に関する検討は、河西ら、高橋らなどの解剖体による詳細な報告がある [6,7].

表 1 に河西らの 100 例の調査と今回の結果との比較を、気管支動脈の起始部および左右気管支動脈の分岐パターンに関して行った。1 例あたりの気管支動脈の合計本数は、今回の結果は河西らの報告に比べ約 0.9 本少なかった。手術では同定された 6 本の右気管支動脈が見逃されたように、微小な分岐が CT では同定できなかつた可能性が高い。また、起始部や分岐パターンを比較すると、鎖骨下動脈からの分岐するものが今回の結果では少ない傾向にあった。鎖骨下動脈から起始する気管支動脈は細い傾向にあるといわれており[6]、現在の CT の空間分解能では同定困難であった可能性が考えられる。それ以外の気管支動脈の起始部や分岐パターンに関しては、河西らの報告と概ね同様の傾向にあり、MDCT による気管支動脈の解剖の評価は十分信頼性が高いのではないかと推察された。

- 気管支動脈の解剖：術前情報として重要な点

気管支動脈の起始レベルや大動脈開口部の位置、分岐パターン、縦隔内走行など解剖学的情報を術前に知ること、手術での同定能を向上させ、不必要な出血や誤切除を予防することが可能と考えられる。特に、大動脈開口部、分岐パターン、食道と気管との関係を含めた周囲縦隔内構造との関係は、内視鏡手術を行う上で極めて重要と考えられる。

大動脈開口部に関して、右気管支動脈は内側、左気管支動脈は前外側での開口が多いことが知られている[13]。今回の検討では、気管支助間動脈幹起始の右気管支動脈は全例で内側開口であったが、大動脈直接起始の右気管支動脈は内側開口が 60%、前外側開口が 40%であった。また、左気管支動脈は、通常言われているのとは異なる内側開口のものも、31%と比較的多く認められた。左気管支動脈や食道左側を走行する右気管支動脈が大動脈の内側方向から起始する場合、食道の処理の際に損傷しないような注意が必要となる。左右共通幹は前外側開口 74%、内側開口 26%であり、解剖学的に左気管支動脈に類似している傾向があった。

今回は、気管支動脈の分岐パターンと食道と気管との関係を含めた縦隔内の走行を検討した。

右気管支動脈は食道右側、左気管支動脈は食道左側の走行が一般的とされている。今回の検討では、右気管支動脈は、最も多い気管支助間動脈幹起始の場合、全例で食道右方走行であったのに対し、大動脈直接起始の右気管支動脈は食道右側走行が 20%、食道左側走行が 80%であった。そのうち前者の食道右側走行の症例では、全例で気管支

助間動脈幹起始の右気管支動脈が欠如しており、これが気管支助間動脈幹由来の右気管支動脈の代替として存在していると思われた。後者の食道左側走行の右気管支動脈の症例では、全例で気管支助間動脈幹が別に存在しており、2 本目の右気管支動脈として存在していた。

左気管支動脈は恒常的に食道左側を走行していた。左右共通幹の場合も全例で食道左側を走行しており、上述した大動脈開口位置の傾向とあわせてこの点からも左気管支動脈に類似した発生が示唆される。

内視鏡による食道切除の場合、胸腔の右側からのアプローチとなる。その場合、食道処理に際して、食道左側走行の右気管支動脈は食道の裏側を走行していることとなるので、不用意な動脈損傷をしないように注意が必要と考えられる。

また、気管支動脈は気管背側を走行することが多いとされているが、食道左側を走行する大動脈直接起始の右気管支動脈や左右共通幹において、気管腹側を走行する例が少なからずみられた。そのような例においては、気管分岐部や主気管支のリンパ節処理の際に誤って損傷することがないように注意する必要がある。

3 D-simulation 画像は、このような開口部、分岐パターン、食道や気管との位置関係を含めて、術前情報として重要な気管支動脈解剖に関する情報を提供してくれる。

- 今後の課題

胸腔鏡下手術の場合、気管支動脈が重要な構造であることは述べたが、その他にも胸管や神経（迷走神経や反回神経）も手術手技や術後合併症に関与する重要な構造である。胸管や神経は現在の MDCT の空間分解能で描出可能なサイズと思われるが、CT ではコントラスト分解能が不十分であり、正確な同定や 3D 画像作成は困難である。一方で、MRI は様々なシークエンスを用いることで、これらの構造を CT よりも高い精度で描出させることが可能と思われ、特に胸管の描出に関してはいくつかの報告がなされている[17,18]。しかし、縦隔など広い範囲を高い空間分解能で撮像するという点では、MRI は CT に劣っており、また今回の 3D simulation のように、他の縦隔内構造との fusion を作成する技術も未熟な段階である。

将来的な展望としては、気管支動脈を含めた縦隔内の細かな血管は MDCT により描出し、また胸管や神経は MRI での特異的なシークエンスを用いて描出、

さらに腫大リンパ節は PET-CT で、それ以外の縦隔構造もそれにあった modality などを用いて、というように複数の modality を用いることで手術に必要な構造を描出させ、これらの multi-modality 3D image をより高度な Workstation により fusion させることができれば、さらに実際の手術に近づいた 3D 画像が可能となり、術前 simulation としての完成度が高まることが期待される。

研究 3. Dual source CT による心臓画像診断の研究

4.1 はじめに

心臓の MDCT 診断は著しく進歩したが、時間分解能の限界により、頻拍症例での限界があった。今回、Dual source/energy CT により、83ms の高時間分解能での心臓 4 次元 CT が可能となり、様々な心疾患での応用を進めている。

4.2 対象と方法

対象：冠動脈疾患，弁膜疾患，先天性心奇形，不整脈疾患

解析方法：冠動脈解析，心筋パーフュージョン，4 次元心機能解析，不整脈のアブレーション術前イメージ，

4.3 結果

従来 CT での画像に比べ、心収縮期での画質向上により、機能解析の精度が向上し、冠動脈描出成功率が非常に向上した。不整脈治療効果としての心房機能解析が進行中である。弁膜疾患については、弁膜の 4 次元描出が可能となった。

(図 6)

研究 4. Dual energy CT による大動脈，末梢血管，肺動脈解析

5.1 はじめに

Dual source/energy CT は生体物質の X 線エネルギー・放射線吸収特性の差異を利用して生体構造の画像上での segmentation やヨード造影剤成分のみの分布の画像化等全く新しいパラメーターを利用した画像診断を可能にした。我々はこれを血管疾患に応用し、動脈病変や血流分布、臓器 perfusion の研究を進めている。

5.2 対象と方法

対象：閉塞性動脈硬化症，大動脈瘤，肺動脈血栓塞栓症

方法：80kV，140kV の dual energy CT による，3 次元 CT アンギオグラフィー，肺血流 perfusion 解析

5.3 結果

従来 CT では骨除去の画像処理を必要とした CT アンギオグラフィーの血管抽出が dual energy factor の解析により可能となった。(図 7)

肺血流 perfusion を胸部の解剖学的画像と superimpose し、肺血流障害を来たす疾患の新たな高空間分解能の機能的診断が可能になると思われる。現在、症例を増やしながら検討中である。(図 8)

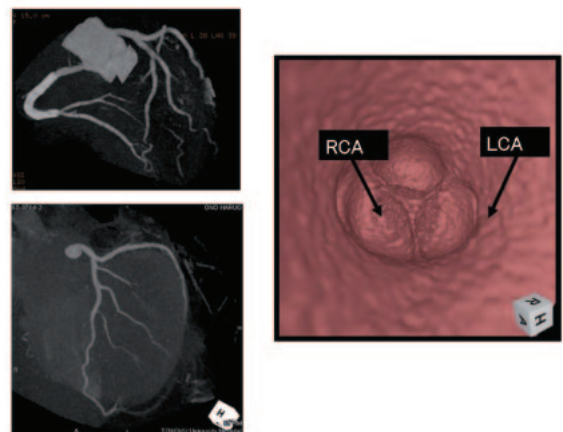


図 6. 心臓 CT：冠動脈に加え大動脈弁尖の状態が良好に描出される。



図 7. Dual Energy CT による大血管画像：骨構造が自動的にほとんど除去されている。

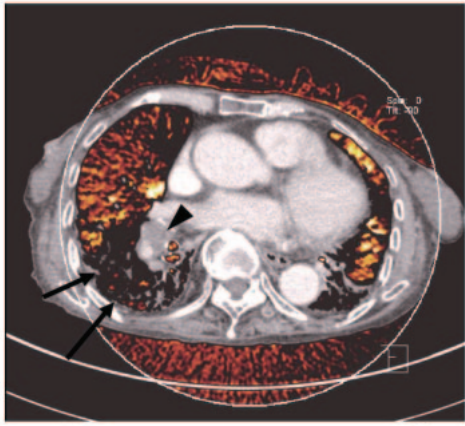


図8. Dual Energy CTによる肺動脈血栓塞栓症の画像：肺動脈血栓（矢頭）に加え，肺の血流 perfusion 低下部位が色の欠損として診断できる（矢印）。

文献

- [1] Yamamoto S, Kawahara K, Maekawa T, Shiraishi T, and Shirakusa T. Minimally invasive esophagectomy for stage I and II esophageal cancer. *Ann Thorac Surg* **80**, 2070-2075, 2005.
- [2] Akaishi T, Kaneda I, Higuchi N, Kuriya Y, Kuramoto J, Toyoda T, and Wakabayashi A. Thoracoscopic en bloc total esophagectomy with radical mediastinal lymphadenectomy. *J Thorac Cardiovasc Surg* **112**, 1533-1540, discussion 1540-1541, 1996.
- [3] Osugi H, Takemura M, Lee S, Nishikawa T, Fukuhara K, Iwasaki H, and Higashino M. Thoracoscopic esophagectomy for intrathoracic esophageal cancer. *Ann Thorac Cardiovasc Surg*, Review **11**, 221-7, 2005.
- [4] 宮崎修吉, 里見進. 食道癌に対する胸腔鏡下手術の現状と問題点. *臨外* **57**, 1347-52, 2002.
- [5] Pramesh CS, Mistry RC, Sharma S, Pantvaiddya GH, and Raina S. Bronchial artery preservation during transthoracic esophagectomy. *J Surg Oncol* **85**, 202-203, 2004.
- [6] 河西達夫, 千葉正司. 気管支動脈の起始と走行. *弘前医学* **33**, 386-403, 1981.
- [7] 高橋大八郎. 気管支動脈の肉眼解剖学的研究とその臨床的意義. *弘前医学* **42**, 230-242, 1990.
- [8] Matsuki M, Kani H, Tatsugami F, Yoshikawa S, Narabayashi I, Lee SW, Shinohara H, Nomura E, and Tanigawa N. Preoperative assessment of vascular anatomy around the stomach by 3D imaging using MDCT before laparoscopy-assisted gastrectomy. *AJR Jul* **183**, 145-51, 2004.
- [9] Wunderlich H, Reichelt O, Schubert R, Zermann DH, and Schubert J. Preoperative simulation of partial nephrectomy with three-dimensional computed tomography. *BJU Int* **86**, 777-81, 2000.
- [10] Sawamura Y, Takase K, Kikuchi S, and Ito T. Multislice helical computed tomography for minimally invasive cardiac surgery. *Ann Thorac Surg* **71**, 1707, 2001.
- [11] 小林健, 柴田義宏, 米田憲二, 松井修. 16列MDCTにおける正常気管支動脈描出能の検討. *臨床放射線* **49**, 109-114, 2004.
- [12] Goo JM, Im JG, Ahn JM, Moon WK, Chung JW, Park JH, Seo JB, and Han MC. Right paratracheal air cysts in the thoracic inlet: clinical and radiologic significance. *AJR Am J Roentgenol* **173**(1), 65-70, 1999.
- [13] Remy-Jardin M, Bouaziz N, Dumont P, Brillet PY, Bruzzi J, and Remy J. Bronchial and nonbronchial systemic arteries at multi-detector row CT angiography: comparison with conventional angiography. *Radiology* **233**, 741-9, 2004.
- [14] Cuschieri A, Shimi S, and Banting S. Endoscopic oesophagectomy through a right thoracoscopic approach. *J Roy Coll Surg Ed* **37**, 7-11, 1992.
- [15] Mori K. The mediastinal courses of the bronchial arteries: helical CT evaluation. *Nippon Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi* **61**, 156-62, 2001.
- [16] Murayama S, Hashiguchi N, Murakami J, Sakai S, Matsumoto S, Mizushima A, Hasuo K, and Masuda K. Helical CT imaging of bronchial arteries with curved reformation technique in comparison with selective bronchial arteriography: preliminary report. *J Comput Assist Tomogr* **20**, 749-55, 1996.
- [17] Matsushima S, Ichiba N, Hayashi D, and Fukuda K. Nonenhanced magnetic resonance lymphoductography: visualization of lymphatic system of the trunk on 3-dimensional heavily T2-weighted image with 2-dimensional prospective acquisition and correction. *J Comput Assist Tomogr* **31**, 299-302, 2007.
- [18] Hayashi S and Miyazaki M. Thoracic duct: visualization at nonenhanced MR lymphography--initial experience. *Radiology* **212**, 598-60, 1999.
- [19] Mulatero P, Stowasser M, and Loh KC. Increased diagnosis of primary aldosteronism, including surgically

correctable forms, in centers from five continents. *J Clin Endocrinol Metab* **89**, 1045-1050, 2004.

[20]Doppman JL, Gill Jr JR, and Miller DL. Distinction between hyperaldosteronism due to bilateral hyperplasia and unilateral aldosteronoma: reliability of CT. *Radiology* **184**, 677-682, 1992.

[21]Radin DR, Manoogian C, and Nadler JL. Diagnosis of primary hyperaldosteronism: importance of correlating CT findings with endocrinologic studies. *AJR Am J Roentgenol* **158**, 553-557, 1992.

[22]Magill SB, Raff H, Shaker JL, and et al. Comparison of adrenal vein sampling and computed tomography in the differentiation of primary aldosteronism. *J Clin Endocrinol Metab* **86**, 1066-1071, 2001.