ノート

肺動静脈造影CT撮影における肺静脈への造影剤到達時間について

Time for the contrast medium to reach the pulmonary vein in contrast CT imaging of the pulmonary arteries and veins

平野 真理

社会医療法人北海道恵愛会札幌南三条病院

Key words: Three-dimensional image, Pulmonary arteriovenous, Contrast agent arrival time, Pulmonary vein, Surgical support image

【Abstract】
The Computed Tomography scan used to create a pulmonary arteriovenous three-dimensional image to support pneumonectomy used a bolus tracking method. In the Computed Tomography scan, there was a case in which the contrast medium did not reach the pulmonary vein in the lung field area with the lesion. A retrospective examination of the previously performed three-phase imaging revealed that 82% of the cases did not reach the pulmonary vein at the same time as the contrast medium. In order to avoid poor contrast, it is necessary to change the imaging method depending on the case. For cases in which an appropriate region of interest could not be set by the bolus tracking method, the time when the contrast medium reached the pulmonary vein at the latest was investigated. It was 26.3 seconds.

【要 旨】
肺切除術を支援する肺動静脈3次元画像を作成するための，ボーラストラッキング法を用いた造影CT撮影で，病変がある肺野領域の肺静脈に造影剤が到達していない症例を経験した．対策のため多相撮影画像の後ろ向き調査を行い，造影剤が肺静脈に同時に到達しない症例が全体の82%あることが分かった．造影不良を回避するためには，症例により撮影方法を変える必要があると考えた．ボーラストラッキング法で適切なROIを設定できない場合の撮影のために，最も遅く造影剤が肺静脈に到達した時間を調べたところ，26.3秒であった．

1. 緒　言

肺癌診療ガイドライン2020では，臨床病期Ⅰ-Ⅱ期非小細胞肺癌に対する標準治療は外科切除であり，肺葉切除と肺門・縦隔のリンパ節郭清を標準術式としている．また肺葉切除を胸腔鏡補助下手術（video-assisted thoracic surgery：VATS）で行うことは，臨床病期Ⅰ期非小細胞肺癌に対して行うよう弱く推奨（提案）されている[1]．肺切除術を安全に行うためには，血管の処理を安全かつ確実に行うことが重要だが，肺動脈（pulmonary artery：PA）と肺静脈（pulmonary vein：PV）の分岐には多くのバリエーションがあり，個々の解剖学的構造を術前に理解することができる3次元画像は，特にVATSにおいてより安全な手術に貢献する[2~4]．computed tomography（CT）画像を用いた肺動静脈の3次元画像をワークステーションで容易に作成するための造影剤使用撮影法は多数報告されている[5~7]．当院においてもPAとPVをそれぞれ時相の異なる画像で作成し，重ねて表示する多相撮影法を行って肺動静脈3次元画像を作成してきた[5]が，多相撮影の画像で動作しないワークステーションの肺動静脈自動分離機能を導入するため一相撮影に変更した．撮影方法はPAとPVを容易に分離できるとされる撮影法ではなく，画像作成に時間を要しても簡便なボーラストラッキング法を用いることとした．しかし，region of interest（ROI）を下行大動脈に置いて，造影剤が到達した時点で撮影を開始するボーラストラッキング法において，病変がない肺野領域のPVは造影されているが，病変がある肺野領域のPVに造影剤が到達していない肺癌症例を経験した．病変のある肺野領域のPVと病変がない肺野領域のPVでは，造影剤が到達する時間に差があると推測されたが，その報告はない．そこで肺癌症例の多相撮影画像で，造影剤が注入開始からPVに到達する時間を調査した．さらに病変の有無でPVに造影剤が到達する時間に差があるかを明らかにするため，左心房に流入する4カ所のPVのCT値時相変化を調べた．CT値時相変化は病変の有無だけではなく多様であったため，分類を行って変化の要因を検討した．

HIRANO Mari
Hokkaidokeiaikai Sapporominamisanjo Hospital
Received September 5, 2021; accepted Jun 16, 2022

2. 方 法

2-1. 使用装置

CT装置は80列CT装置Aquilion PRIME TSX-303A（キヤノンメディカルシステムズ），インジェクターはデュアルショットGX7（根本杏林堂）を使用した．ワークステーションはZiostation2（ザイオソフト）を使用した．統計ソフトはIBM SPSS Statistics（IBM.version20）を使用した．

2-2. 対象

対象は，2013年6月から2016年6月までに，肺葉切除術支援目的で肺動静脈3次元画像を作成した多相撮影症例834例である．そのうち病変の大きさが7mm×8mm×11mmから73mm×55mm×79mmまでで，肺の長さの中央値（範囲）が273（220-325）mmである44症例（男24，女20），年齢41歳から86歳（60歳以下7症例，60歳代16症例，70歳代13症例，80歳以上8症例）を使用してPVのCT値を測定した．なお，本研究は当院における倫理委員会により承認されている（承認番号第29-5）．

2-3. 造影および撮影方法

検討に使用したデータはtest bolus tracking（TBT）法[8]を用いた多相撮影である．PAにROIを置いてtime enhance curveを目視で確認し，造影剤がPAに達して下降を始めた時点で撮影を開始する撮影方法とし，ディレイタイム11秒後に尾頭方向・頭尾方向・尾頭方向へ連続して三相のダイナミックヘリカルスキャンを行った．

TBTの造影剤投与方法として，テストボーラスを2秒，生理食塩水を5秒注入し，インターバルの5秒後にメインボーラスを7秒注入し，生理食塩水で後押しした．造影剤の注入は27mgI/kg/secで，オムニパーク350mgI（GEヘルスケアファーマ）を使用した．

撮影条件は，0.5mm×80列，管電圧120kV，管球回転速度0.35秒～0.5秒，ピッチファクター1.112，撮影時間13.1秒～13.8秒．管電流の設定はautomatic exposure control（AEC）を設定スライス厚2mm 逐次近似AIDR3D（Mild）においてstandard deviation（SD）8になるよう設定した．CTDIvolは中央値（範囲）が1,841.1（869.2-2,684.2）であった．CT値測定に用いた画像はスライス厚5mm，FC13の画像である．

2-4. 検討項目と方法

2-4-1. PVに造影剤が到達した時間

多相撮影でPVの3次元画像を作成した時相を造影剤がPVに到達した時間とし，造影剤注入開始からの時間を次式により求め，PVに造影剤が到達するのが最も遅かった時間を抽出した（Fig.1）．

PVに到達した時間（秒）＝（a-12）+11+（b/3×c）
－（b/3×1/2）

1）テストボーラス造影剤のROI到達を目視で確認し撮影を開始した時間（造影剤注入からの時間）：a秒
2）撮影時間：b秒
3）PVの3次元画像を作成した時相（1または2または3）：c
4）テストボーラス造影剤注入開始から，メインボーラス造影剤注入開始までの時間：固定値12（2+5+5）秒
5）ディレイタイム：固定値11秒

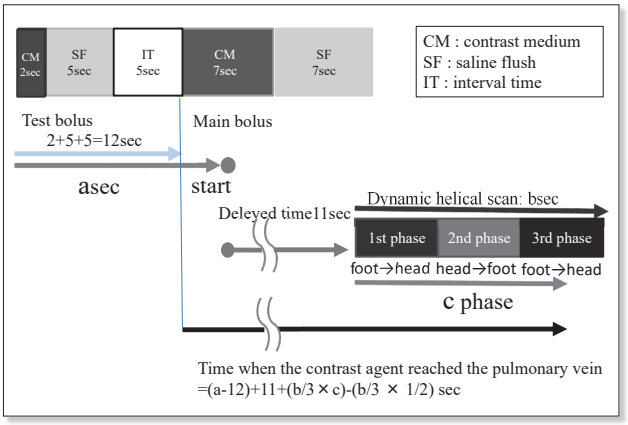


Fig.1 Three-phase scan using the TBT method
The time the contrast agent reached PV was calculated from the time it took for the test bolus contrast agent to reach PA and the time PV three-dimensional image was created.

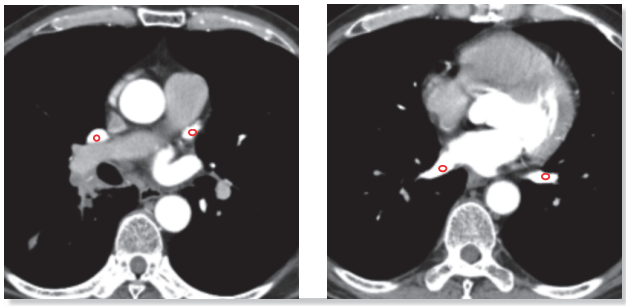


Fig.2 CT value of PV flowing into the left atrium
CT values of the right upper pulmonary vein, left upper pulmonary vein, right lower pulmonary vein, and left lower pulmonary vein flowing into the left atrium were measured.

2-4-2. PVのCT値経時変化

44症例について，左心房に流入する右上PV，左上PV，右下PV，左下PVの4カ所に対し，三相分計12カ所の血管CT値を測定し，経時変化を調べた（Fig.2）．

4カ所のPVの時相間CT値差を求め，CT値差中央値四分位範囲の25%から75%に入るCT値差をA群，中央値四分位範囲外のCT値差をB群とした．左右上下の4つの静脈がどの群に属するかを検証し，Fig.3に示すフローチャートに沿って4種類に分類した．4カ所のPVが全部A群，または全部B群である場合を「分類1，CT値の変化に差がない」とし，4カ所のPV（右上，左上，右下，左下）が（A，A，B，B）または（B，B，A，A）となる場合を「分類2，CT値の変化が上葉と下葉で異なる」とした．病変を有する肺野領域の肺静脈が1カ所のみB群またはA群となる場合，「分類3，病変のあるPVの造影剤到達が遅い」とした．上記分類1から3以外を分類4とした．円グラフを作成し，PVに造影剤が到達する時間に差がある症例の割合を調べた．

2-4-3. PVのCT値経時変化に影響する要因の検討

4カ所のPVのCT値経時変化が，性別，肺の長さ，年齢の影響を受けているか検討した．性別は男性と女性，肺の長さは220mm～255mm，255mm～290mm，290mm～325mmに三等分し，年齢は59歳以下，60歳代，70歳代，80歳以上の4つに分割して，分類割合を比較した．性別について分類1であるか分類1以外であるかに分け，分類割合に有意差があるか検討した．Fisherの正確検定を行い，分類2，3，4についても同様に行った．肺の長さと年齢について，2つの分類に中央値の差で有意差があるか検討した．分類の全組み合わせ（分類1と分類2，分類1と分類3，分類1と分類4，分類2と分類3，分類2と分類4，分類3と分類4）でMann-WhitneyのU検定（両側検定）を行った．有意水準は5%とした．

3. 結　果

3-1. PVに造影剤が到達した時間

PV3次元画像の撮影時間で最も遅かったのは，造影剤注入開始から26.3秒であった．中央値（範囲）は20.2（13.1-26.3）秒であった（Fig.4）．

3-2. PVのCT値経時変化

Fig.5に，左心房に流入する4カ所のPVのCT値経時変化を示す．病変がある領域のPVのCT値を黒線とした．

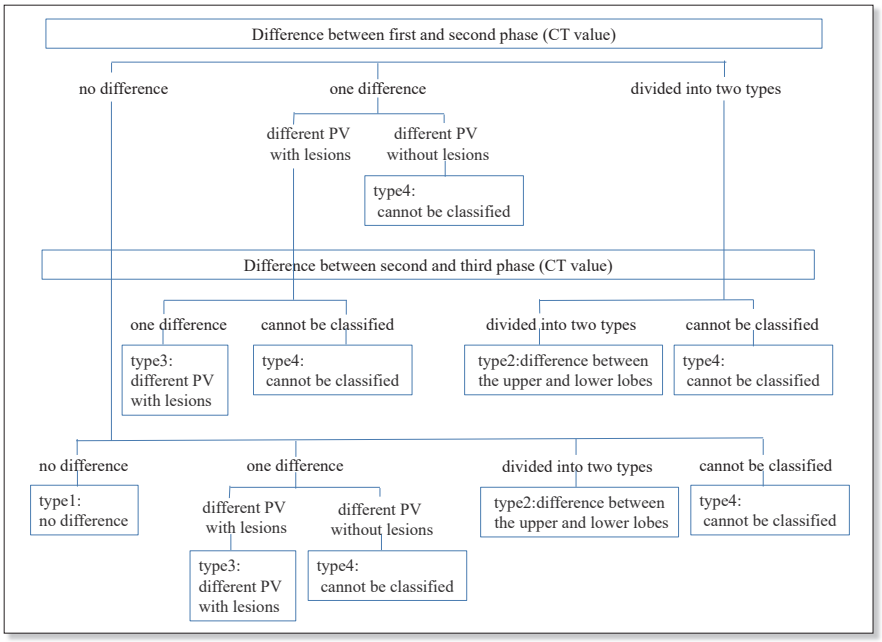
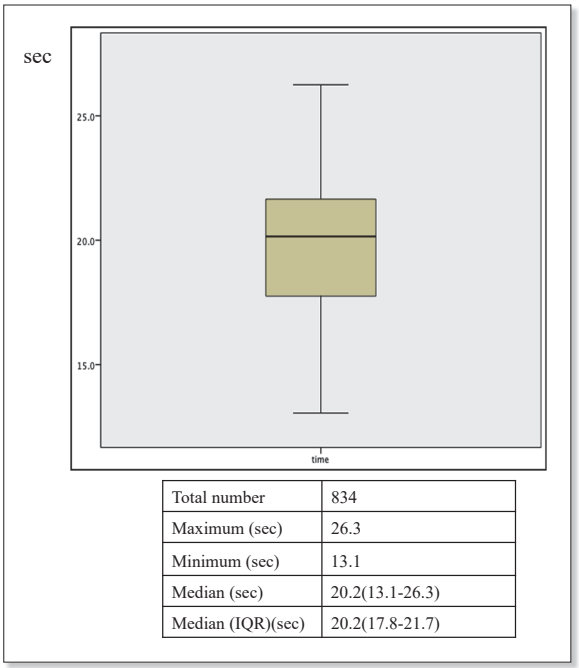


Fig.3　Style classification flowchart

The difference in CT values between the time phases of PV at 4 points was calculated. The median quartile of the difference in PV CT values was calculated. PV was classified according to whether the CT value difference was within or outside the median interquartile range. Cases were classified into four types according to the flowchart. Type1 no difference, type2 difference between the upper and lower lobes, type3 different PV with lesions, type4 cannot be classified.

一相目と二相目におけるPVのCT値差の中央値（四分位値）は205（151-256）HUであった．また二相目と三相目におけるPVのCT値差の中央値（四分位値）は-47（(-155) -43) HUであった．フローチャートを基に分類した結果，分類1が8症例18%，分類2が14症例32%，分類3が14症例32%，分類4が8症例18%であった．差の有無で分けた場合，PVのCT値経時変化に差がある症例は82%となった（Fig.6）．



Total number	834
Maximum (sec)	26.3
Minimum (sec)	13.1
Median (sec)	20.2(13.1-26.3)
Median (IQR)(sec)	20.2(17.8-21.7)

Fig.4　Times when the contrast medium reached PV
The latest time the contrast medium reached PV was 26.3 seconds.

3-3. PVのCT値経時変化に影響する要因の検討

Fig.7に分類割合の性別と肺の長さの違いによる比較を，Fig.8に分類割合の年齢による比較を示す．

性別についてのFisherの正確検定では，分類1の比較でP値が0.48，分類2の比較でP値が1.00，分類3の比較でP値が0.20，分類4の比較でP値が0.71となり，全ての分類でP値が0.05以上となり，男性と女性では分類割合に有意差を認めなかった．肺の長さの中央値（範囲）は分類1が288（258-308）mm，分類2が270（226-312）mm，分類3が274（220-310）mm，分類4が265（228-300）mmであった．全ての組み合わせに対し有意水準5%のMann-WhitneyのU検定（両側検定）で検定した結果P値が0.05以上となり，有意差を認めなかった．分類の年齢の中央値（範囲）は分類1が66（41-74）歳，分類2が74（57-86）歳，分類3が66（51-82）歳，分類3が72（49-83）歳であった．比較をfig.9に示す．有意水準5%のMann-WhitneyのU検定（両側検定）で検定した結果，「分類1，各PVCT値時相変化に差がない」と「分類2，CT値の変化が上葉と下葉で異

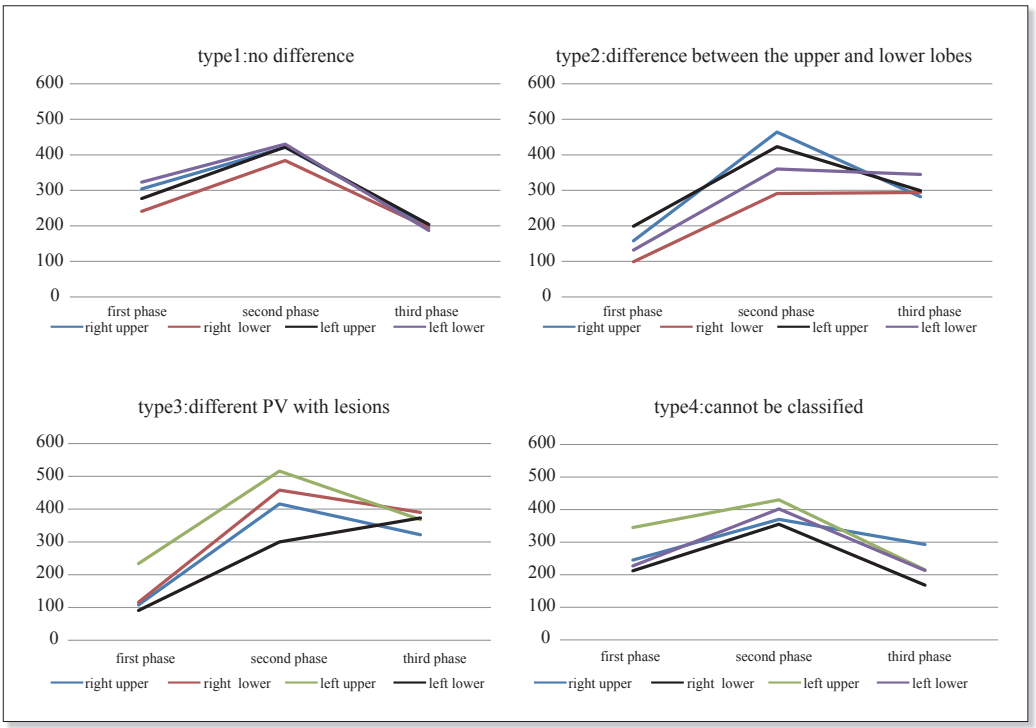


Fig.5　How the CT value of PV changes over time
The change in the CT value of PV over time was graphed. The CT value of PV in the affected area is displayed in black.

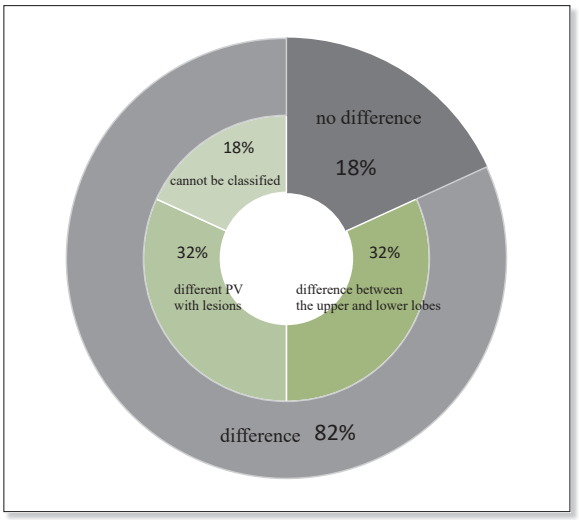


Fig.6　Classification how the CT value of PV changes over time

There was no difference in the CT value of PV in 18% of cases, and there was a difference in CT value in 82% of cases.

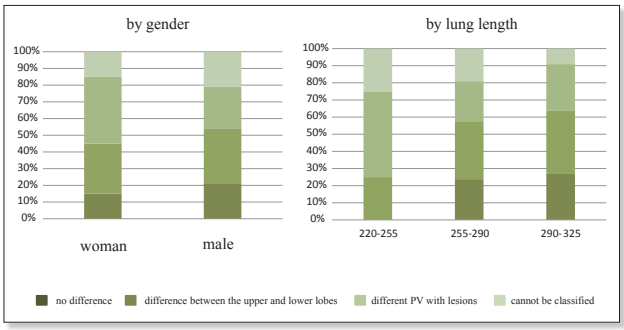


Fig.7　Examination of factors that influence how the CT value of PV changes

There was no difference in the appearance rate of the CT value classification of PV over time in gender and lung length.

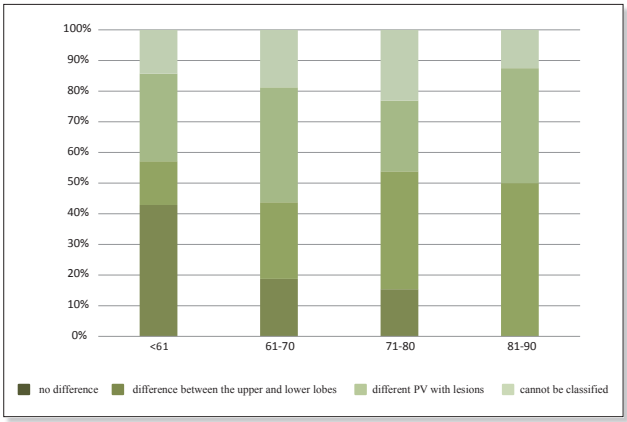


Fig.8　Examination of whether age affects how the CT value of PV changes

The incidence of type 1 was high under age 61 and decreased with age. The incidence of type 2 increased with age.

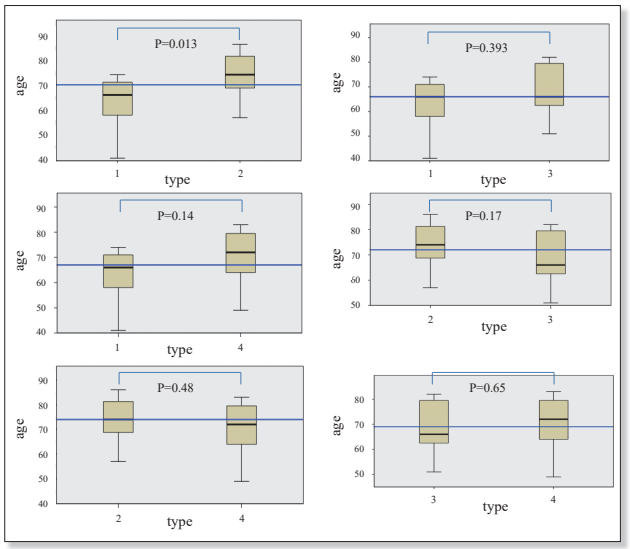


Fig.9　Compare how PV CT values change with median age

A significant difference was found by comparing the median difference in age between type 1 and type 2. The other combinations gave results that were not significantly different.

なる」の比較のP値が0.013となり，有意差を認めた．その他の組み合わせはP値が0.05以上となり，有意差を認めなかった．

4. 考　察

肺切除術において，高度の癒着を伴う症例や不全分葉の強い症例では，開胸術でも肺動脈分枝の同定や処理の難易度が高いが，3次元画像で術前に立体的に分枝形態の把握を行えたことから，血管処理を安全に行うことが可能であったと田中らは述べている[2]．当院でも肺切除術のために肺動静脈3次元画像を必ず作成しているが，多相撮影画像で作成していたときは造影不良で3次元画像を作成できない症例はなく，一相撮影に変更する際，左心房に流入するPVにCT値差が存在する可能性は想定できなかった．今回，3次元画像を作成した多相撮影画像を調査し，造影剤が左心房に流入する各PVに同時に到達する症例の方が少なく，造影剤到達時間には差があることを確認した．病変のある領域のPVに造影剤の到着が遅い症例は，病変の大きさ・位置が関係していることが考えられるが，上葉と下葉で造影剤が到達する時間に差が出たのは，加齢による何らかの機能の変化が影響していると考える．またその他の分類の中には病変のない肺野領域の左PVの上下が，1つにまとまって流入する正常

変異のPV共通幹[9]で，右PVとはCT値の変化が異なる症例もあった．PVには多くの形態があり[10]，同じ造影剤到達時間にならない原因の一つである可能性があると考えられるが，今回は検討を行っていない．また今回の検討の限界は，1つのPVに対する時系列の測定は三点であるため，正確にCT値の変化を捉えたとは言えないことであり，さらに詳細な検討が必要である．PVのCT値経時変化の分類についても，研究方法を変えて検討する必要がある．しかし，PVに造影剤が同時に到達しない症例が多いことは分かった．これは，早い時間で到達する造影剤を捉えて撮影を開始する方法では，到達時間が遅いPVが造影不良になる可能性があることを示している．造影不良を回避するためには症例により撮影方法を変える必要があると考える．ボーラストラッキング法を用いた撮影は，目的とする肺野領域のPVに造影剤が到達したタイミングを捉えるROIの設定を行う必要がある．適切なROIを設定できない場合，造影剤がPVに到達する時間を予測することが重要と考え，PVの3次元画像を作成した画像の中から最も遅く造影剤が到達した時間を調べたところ，26.3秒であった．造影剤を注入し続け26.3秒後に撮影すれば造影不良は回避できる可能性が高いと考える．撮影時の情報を詳細に記録していた事項を後ろ向きに調査することにより，目的とするPVに造影剤が到達する前に撮影を行ってしまった症例で起こったCT値変化を推測し，改善を行う項目を見つけることができた．

5. 結　語

多相撮影を行った画像の後ろ向き調査で834例のうち，造影剤がPVに最も遅く到達したのは26.3秒であった．左心房に流入するPVに造影剤が到達する時間には差があり，同時に到達する症例の方が少なかった．

6. 利益相反

開示すべき利益相反はない．

図の説明

Fig.1　TBT法を用いた三相撮影
Test bolus造影剤がPAに達した時間とPV3次元画像を作成した時相から造影剤がPVに達する時間を求めた．

Fig.2　左心房に流入するPVのCT値
左心房に流入する右上PV，左上PV，右下PV，左下PVのCT値を測定した．

Fig.3　PVのCT値経時変化の分類
PVの時相間CT値差を求め，中央値四分位範囲内であるか範囲外であるかを検証しフローチャートに沿って4種類に分類した．「分類1，CT値の変化に差がない」「分類2，CT値の変化が上葉と下葉で異なる」「分類3，病変のあるPVの造影剤到達が遅い」「分類4，分類1から分類3に当てはまらない」とした．

Fig.4　PVに造影剤が到達した時間
PVに最も遅く造影剤が到達した時間は26.3秒であった．

Fig.5　PVのCT値経時変化
病変がある肺野領域のPVのCT値を黒で表示した．

Fig.6　CT値経時変化の分類
PVのCT値経時変化に差がない症例は18%で，82%の症例においてCT値の経時変化は同じではなかった．

Fig.7　CT値経時変化に影響する要因の検討
PVのCT値経時変化分類の出現率は性別と肺の長さにおいて差はなかった．

Fig.8　CT値経時変化分類の年齢の比較
CT値経時変化に差がない分類1の出現の割合は61歳以下で多く，年齢が高くなると減った．CT値経時変化が上葉と下葉で異なる分類2の出現率は年齢が高くなると増えた．

Fig.9　CT値経時変化分類の年齢の中央値の比較
「分類1，各PVCT値時相変化に差がない」と「分類2，CT値の変化が上葉と下葉で異なる」の比較のP値が0.013となり，有意差を認めた．その他の組み合わせはP値が0.05以上となり，有意差を認めなかった．

参考文献

1) 日本肺癌学会　編：肺癌診療ガイドライン 悪性胸膜中皮腫・胸腺腫瘍含む 2020年版．金原出版，62-105，2021.
2) 田中俊樹，他：肺癌手術における肺動静脈3D-CT angiographyの有用性．日呼外会誌，19(1)，8-11，2005.
3) Akiba T, et al.: 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.
4) 三澤賢治，他：術前画像が有用であった胸腔鏡下右 S^{10} 区域切除術の1例．日呼外会誌，26(6)，638-641，2012.
5) 赤川拓也，他：当院における肺腫瘍および縦隔腫瘍術前CT Angiographyの現状．徳島赤十字病医誌，16(1)，133-138，2011.
6) 中森克敏，他：肺切除術前3D-CTにおける新しい肺動静脈1相撮影である到達時間推定法の考案．日放技学誌，70(11)，1258-1264，2014.
7) 北野哲哉，他：肺がん胸腔鏡補助下手術前の肺動静脈分離3D-CTAにおける多段階注入による1相撮影法の有用性．日放技学誌，75(10)，1165-1172，2019.
8) 山口隆義，他：新しい造影方法であるtest bolus tracking法の開発と，冠状動脈CT造影検査における有用性について．日放技学誌，65(8)，1032-1040，2009.
9) 安藤耕平，他：左肺静脈共通幹を術前診断し左肺下葉切除術を施行した肺MALTリンパ腫の1例．日臨外会誌，79(10)，2043-2047，2018.
10) Mateusz Polaczek, et al.: Morphology and morphometry of pulmonary veins and the left atrium in multi-slice computed tomography. surgical and radiogic anatomy, 41, 721-730, 2019.