

第2回 X線動態画像 セミナー

日時：2019年11月2日(土)
14:00～17:30

会場：フクラシア八重洲A会議室

CONTENTS

■2. 臨床研究報告

X線動態解析による肺血流評価：
肺血流シンチグラフィとの比較…………… 02

高田 宗尚 金沢大学先進総合外科

X線動態解析を用いた術後肺機能予測の試み…………… 03

花岡 淳 滋賀医科大学呼吸器外科

X線動態解析による肺機能評価：
カニクイザルを対象とした基礎的検討…………… 04

宮武 秀光 滋賀医科大学救急集中治療講座

X線動態解析を用いた新たな
呼吸機能評価法の検討…………… 05

大倉 徳幸 金沢大学呼吸器内科

X線動態撮影を用いた気管径評価の
臨床的有用性検討…………… 06

園田 明永 滋賀医科大学放射線医学講座

総 評…………… 12

工藤 翔二 公益財団法人結核予防会理事長 / 日本医科大学名誉教授

■3. 実臨床における有用性の報告：ディスカッション

胸部 X 線動態撮影の撮影法 …………… 07

由地良太郎 東海大学医学部付属八王子病院診療技術部放射線技術科

COPD, 換気障害症例を中心に …………… 08

坂巻 文雄 東海大学医学部医学科内科学系呼吸器内科学領域
東海大学医学部付属八王子病院呼吸器内科

慢性呼吸器疾患への応用の検討…………… 09

二階堂雄文 福島県立医科大学呼吸器内科学講座

間質性疾患の動き…………… 10

上山 維晋 天理よろづ相談所病院呼吸器内科

X線動態撮影による肺血流評価…………… 11

山崎 誘三 九州大学大学院医学研究院臨床放射線科学分野



X線動態解析による肺血流評価： 肺血流シンチグラフィとの比較

高田 宗尚 金沢大学先進総合外科

当院では、X線動画撮影システムを用いて肺血流評価について検討を行ってきた。本発表では、肺血流シンチグラフィとの比較を中心に報告する。

肺血流シンチグラフィとの 肺血流評価の比較

われわれは、X線動画撮影システムによる血流解析と、肺血流シンチグラフィで計測した肺血流量を比較し、同等の肺血流評価が可能か検証した。対象は同時期にX線動画撮影と肺血流シンチグラフィを施行した呼吸器外科手術症例26例（術前7例、術後19例）で、うち23例が肺がんであった。比較法としては、肺野を6分割して各領域の肺血流量をX線動画撮影システムの改良PH-MODE（基準フレーム差分計算処理）と肺血流シンチグラフィで計測した。その上で、肺血流シンチグラフィの肺血流量をX軸、X線動画撮影システムの肺血流量をY軸にプロットして両者の相関関係を解析し、相関係数が <0.2 （相関なし）、 $0.2\sim0.4$ （弱い相関あり）、 $0.4<$ （相関あり）、さらに P 値 <0.05 （有意差あり）とした。

右肺血流分布では、右上肺野、右中肺野、右下肺野いずれも有意差をもって正の相関関係を示し、X線動画撮影システムと肺血流シンチグラフィは同様の血流分布であった。一方、左肺血流分布は、左上肺野、左中肺野は相関を示したが、左下肺野は十分な相関を認

められなかった。これは心陰影が影響していると思われる。この結果から、X線動画撮影システムは肺血流シンチグラフィと同等の肺血流評価が可能であり、代替検査となりうると言える。

これを踏まえ、症例を提示する。本症例は、78歳、男性の右上葉肺がん切除術を施行したが、術後3か月目に呼吸困難症状が増悪し、再診となった。シンチグラフィを施行したところ、肺換気、肺血流いずれも右肺が左肺よりも有意に低下しており、X線動画撮影システムでの解析を行った。術前と術後のX線動画撮影システムの画像を比較すると、術後では、改良PH-MODEで右肺野の血管陰影の動きが低下し、横隔膜の動きも不自然であり、PL-MODE（相互相関計算処理）でも縦隔の動きに異常が認められた（図1、2）。このように、X線動画撮影システムでは、ほかのモダリティでは得られない動的な機能情報をとらえることができる。

胸膜癒着予測能の検証

当院では、X線動画撮影システムの手術への応用を検討している。そこで、術前胸膜癒着診断への適応を検討するために、術前にX線動画撮影システムで撮影を行ってから呼吸器外科手術を施行した151例で評価を行った。X線動画撮影システムで癒着を示唆する異常因子を抽出し、さらに手術映像から癒着の有無や程度を評価して、X線動画

撮影システムの胸膜癒着予測能を検証した。検証に当たっては、胸膜癒着を予測する所見として、肺野血管/気管支運動に異常がある“Gradation sign (G-sign)”，肺野血管/気管支が固定され動きがない“Fixed sign (F-sign)”，索状性陰影が引きつれたように運動する“Tension sign (T-sign)”の3つとした。

この3つの所見の和（0/1/2/3）を胸膜癒着予測スコア（PAPS）とし、また癒着のグレードをGrade 0：癒着なし、Grade 1：限局的な癒着、Grade 2：胸郭1/3以下の癒着、Grade 3：胸郭1/3～2/3の癒着、Grade 4：全面癒着、の5つに分類した。さらに、PAPSが2以上をカットオフラインとして、中等度（Grade 2）以上の癒着が検出可能かを検証した。

その結果、PAPSが0、1の低リスク群ではほとんど胸膜癒着が見られず、2、3の高リスク群では胸膜癒着が多く、感度95%、特異度96%であった。このことから、X線動画撮影システムで得られたPAPSを用いることで、中等度以上の胸膜癒着の予測が可能だと言える。

まとめ

X線動画撮影システムは、安価で撮影も簡便であり汎用性も高く、また肺血流シンチグラフィよりも被ばく線量を低減でき、肺切除術における術後の呼吸機能の予測や呼吸機能低下の原因検索に有用である。さらに、X線動画撮影システムでは従来評価が困難であった胸郭運動時の動的な異常所見要素の検出が可能である。

これらを踏まえ、X線動画撮影システムは肺血流シンチグラフィの代替検査となりうる可能性があり、また中等度以上の胸膜癒着も予測でき、症例によっては隣接臓器浸潤の評価にも役立てられる。

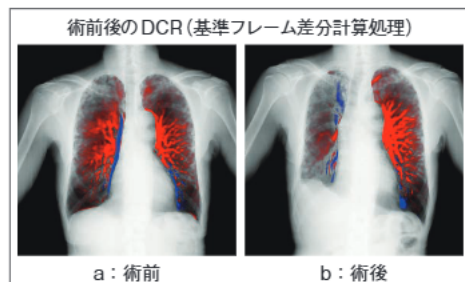


図1 右上葉肺がん切除術の改良PH-MODE

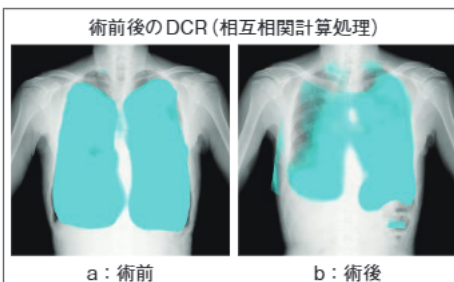


図2 図1と同一症例のPL-MODE

X線動態解析を用いた術後肺機能予測の試み

花岡 淳 滋賀医科大学呼吸器外科



肺がん患者の低肺機能症例が増加しており、肺がん根治手術施行に対する重要な適応・危険因子の評価が重要になっている。本講演では、胸部X線動態解析による血流分布を用いた術後肺機能予測の妥当性の検証について報告する。

X線動態解析を用いた術後肺機能予測の妥当性検証

術後肺機能予測は、術前スパイロメトリーと切除区域数から計算で求められる。ただし、閾値付近の症例では精度を上げる必要がある。肺血流シンチグラフィの血流比を加味することで予測精度は向上するが、手間やコスト、被ばく、緊急性に欠けるといった課題がある。

そこでわれわれは、原発性肺がんの根治手術を施行した症例を対象に、胸部X線動態解析による血流比を加味した術後肺機能予測の妥当性を検証した。

1. 対象と方法

対象は、当科で原発性肺がんに対して根治手術を施行した34例とした。X線動態撮影では、心周期で変化する血管内血流量に応じて変化する画素値計算から左右の血流比を算出した。スパイロメトリーは、術前と術後1, 3, 6か月目に測定し、1秒量 (FEV1) を評価した。術後予測肺機能について、区域計算による予測値と、それにX線動態画像の血流比、肺血流シンチグラフィの血流比を加味した予測値を算出し、FEV1実測値とのPearsonの相関係数 (R) を算出した。

2. 検証結果 (図1)

まず、X線動態画像と肺血流シンチグラフィの左右血流比の相関を検証したところ、 $R = 0.90$ ($p < 0.01$) と非常に高い相関が得られた ($n = 22$)。

術後1か月のFEV1実

測値との相関は、区域計算が $R = 0.91$ 、X線動態画像が $R = 0.92$ 、シンチグラフィが $R = 0.88$ と高い相関が認められた (すべて $p < 0.01$)。同様に、術後3か月は0.94, 0.93, 0.94, 術後6か月は0.94, 0.94, 0.91と、いずれも非常に高い相関が得られた (すべて $p < 0.01$)。

3. 考察

X線動態画像で得られた血流分布を利用した術後予測FEV1は、実測値と高い相関が見られた。ただし、3つの手法の予測精度に大きな差は見られず、これは対象症例の血流分布のバラツキが小さかったためと想定された。

X線動態画像はシンチグラフィと比べ、単純撮影と同時に機能情報を得られ、簡便で短時間かつ低被ばくの検査であるといった利点がある一方で、手技の確立や体動の影響への対応が求められる。今後の課題としては、症例数を増やし、術側や切除肺別の予測精度の検討、血流分布が不均一な症例の評価、ほかの肺機能指標での評価を行う必要があると考える。

血流評価の有用性が期待される症例

1. 術後肺炎の評価 (図2)

症例は、左上葉肺がん切除術を行った慢性閉塞性肺疾患 (COPD) で、術前CTで右肺にすりガラス状陰影が認められていた。術後1か月に倦怠感・息苦しさの訴えがあり、胸部単純X線写真

を撮影したが所見は認められず、CTですりガラス状陰影の拡大を認め、肺炎の増悪と考えられた。同時に撮影したX線動態画像でも、CTの陰影部分に一致して血流低下が認められた。術後6か月で改善が見られ、1年後にはほぼ回復していた。胸部単純X線写真ではわからない所見も、X線動態画像の血流解析で術後肺炎を評価できた。

2. 術側残存肺の過膨張の影響の確認

症例は、左上葉肺がん切除術を行ったCOPD症例。術前から左側の血流が少し低下しており、術後は左下葉の血流がかなり低下した状態が継続していた。ワークステーションにてCTデータから肺葉ごとのボリュームを計測したところ、残存した術側下葉が術前は896mLだったのに対し、術後6か月では1255mLと約1.5倍に過膨張していた。過膨張したことによって、相対的に血流量が下がったと考えられた。

まとめ

今回の検討から、X線動態画像の血流分布は、肺血流シンチグラフィの血流分布を反映していた。また、区域計算による術後肺機能予測にX線動態画像の血流比を加味することで、より精度の高い予測ができる可能性が示唆された。X線動態画像は、より簡便に撮影、血流評価をすることができ、今後期待できる有用な方法であると考えられる。

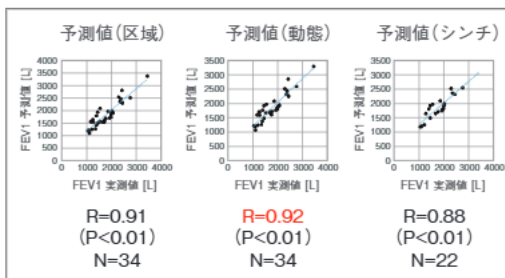


図1 術後予測肺機能の検証結果 (1か月後)

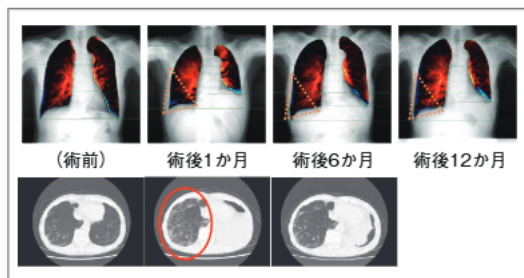


図2 術後肺炎の評価

X線動態解析による肺機能評価： カニクイザルを対象とした基礎的検討

宮武 秀光 滋賀医科大学救急集中治療講座



われわれは、X線動態画像システムによる肺血流の評価と肺塞栓の検出について、カニクイザルを用いて検討したので報告する。

本検討の目的

近年、災害に伴う肺塞栓が循環器診療において一つのトピックとなっている。肺塞栓の診断は造影CTがゴールドスタンダードであるが、被ばくやアレルギー、腎機能低下といったリスクがあり、またCTなどの設備が整った施設でしか施行できない。一方、X線動態画像システムは、低侵襲で肺の動きや血流、心臓の動きを動画像で評価できる。そこで、われわれは、カニクイザルを用いて、X線動態画像システムによる臥位と立位での肺血流の評価および肺塞栓の検出が可能であるか検討した。

検証結果

1. カニクイザルによる実験

本検討では、5匹のカニクイザルを用いて、挿管して台に固定し、スワングアンツカテーテルの挿入により肺血流閉塞モデルを作成した。その上で、X線動態画像システムで正常モデルと肺塞栓モデルの両肺の画素値を比較した。

検討に当たっては、縦に90°回転し臥位と立位が撮影できる寝台を開発し、呼吸停止下に8秒の撮影を施行した。解析方法としては、撮影画像の肺野の上下左右にROIを設定し、心電図1周期中における各部位の画素値の平均と最大変化量を測定した。また、SPSSを用いて正常モデルと肺塞栓モデルの左右の肺の画素値の差を解析したほか、カラーマップも作成した。

正常モデルにおける画素値を見ると、グラフでは周期性を持った変化が描出でき、呼吸性変動を除去すると心電図と同周期で変化を抽出している。さらに、臥位と立位における画素値の変化を見

ると、臥位では上肺野と下肺野の変化に大きな違いはないが、立位では上肺野の変化の幅が減少し、下肺野の幅が有意に増加した。統計的に解析すると、正常モデルでは、臥位と比べ立位で画素値変化率が低下し、上肺野は左右どちらも立位で有意に画素値が低下していた。このことから、立位では、下肺野に血流が行き、上肺野の血流が減少していることが明らかになった(図1)。

一方、肺塞栓モデルでは、閉塞した左肺の画素値の変化幅が減少し、閉塞していない右肺の画素値の変化幅が有意に増加している。また、カラーマップ上では、左下肺野の方が右下肺野よりも赤色に染まっておらず、黒く抜けていた。統計的解析を行うと、正常例では左右差がないが、肺塞栓モデルでは閉塞側の画素値変化量が低下し、非閉塞側の画素値変化量は増加した(図2)。

以上の結果から、①肺野の画素値の変化は、心電図と同じ周期を示しており、②立位は臥位と比較して上肺野の画素値変化量は減少、下肺野の画素値の変化量は増加し、③肺塞栓部位の画素値の変化量は減少し、閉塞していない部位の変化量は増加した、と言える。

画素値の変化量は血流量と相関しているが、その原因として肺動脈の圧の上昇や肺動脈の径の増加のいずれかが、画素値の変化に影響を及ぼしていると考えられた。

2. 血管ファントムによる実験

そこで、追加実験として、内腔を生理食塩水で満たした人工血管と耐圧チューブに肺動脈圧センサを接続し、手動で圧を加えて画素値を測定した。その結果、人工血管では、画素値と圧の相関が認められたが、耐圧チューブでは認められなかった。このことから、X線動態画像システムの画素値の変化は、圧ではなく血管拡張を反映していると考えられた。

まとめ

今回の検討から、肺の画素値の変化量は、肺動脈血流と相関していると考えられる。そして、X線動態画像システムは従来の造影CTや肺血流シンチグラフィと比較して、早期に、低侵襲かつ低コストで、病院外の各所で肺塞栓の診断ができる可能性があり、災害医療で効果を発揮できると考えられる。

今回の実験で使用したカニクイザルは一般的に動脈硬化を認めない。人間の場合は動脈硬化に限らず多様な要因が影響を及ぼすため、今後の臨床研究が期待される。

X線動態画像システムは、既存の検査法と比較し簡便で低侵襲の肺血流評価法であり、肺塞栓などの血流低下を起こす疾患の検出に有用である。今回の検討を踏まえ、われわれは現在、人間を対象とした心不全、肺塞栓におけるX線動態解析の前向き研究を厚生労働省に申請している。

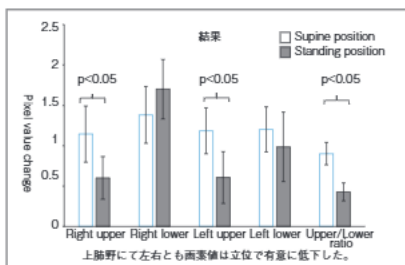


図1 臥位と立位における肺野の画素値の変化

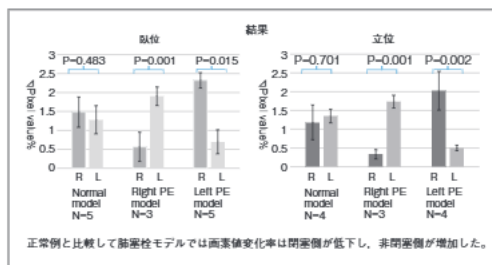


図2 正常モデルと肺塞栓モデルとの画素値変化率の比較



X線動態解析を用いた 新たな呼吸機能評価法の検討

大倉 徳幸 金沢大学呼吸器内科

当院では、胸部X線動態解析の臨床応用を検討してきた。本発表では、呼吸変動による肺面積変化率の検討結果を報告する。

はじめに

胸部X線動態解析は、低侵襲かつ簡便に呼吸機能の評価が可能で、また呼吸機能を視覚化して観察できる。そこで、われわれは、閉塞性換気障害患者および間質性肺疾患患者を対象に、胸部X線動態解析を用いた呼吸変動による肺面積変化率について検討した。

閉塞性換気障害での検討

本検討では、胸部X線動態解析を行った233例のうち、1秒率 (FEV1%) が70%未満の肺がん術前や慢性閉塞性肺疾患 (COPD)、気管支喘息、喘息・COPD オーバーラップ症候群 (ACO) の118例を対象にした。うち男性が87例で、平均年齢は71.4歳、FEV1%は平均59%、%1秒量 (%FEV1) は平均95.9%で軽度の気流制限があるほか、%最大呼気中間流量 (%MMF) は平均28%、残気量 (RV) が上昇し、肺拡散能力 (DL_{CO}) が低下している軽度のCOPD集団である。その肺面積変化率と肺気量分画および強制呼出曲線との関係を見ると、強制呼出曲線よりも肺気量分画の方が相関値が高いという結果になった (表1)。一番高いのはRVであり、

このことから過膨張を最も反映していると考えられる。さらに、1秒量 (FEV1) の程度により、軽症が80%以上、中等症が50~80%未満、重症が50%未満で層別化すると、軽症例は正常例とあまり変わらないが、中等症、重症と進むに伴い低い値となり、気流制限が進行するほど肺面積変化率が低下したことが示された。

また、安静換気下で呼吸機能を可視化するモストグラフとの各パラメータを比較すると、気道抵抗および呼吸リアクタンスそれぞれの値がいずれも有意に相関しており、気流制限や換気不均等と関連していると考えられた。

症例は53歳、男性で術前の呼吸機能検査で閉塞性換気障害が指摘された (図1)。気管支喘息や鼻炎の合併・既往はないが current smoker で、CATスコアは15点であった。また、%FEV1は49.7%、RVが上昇し、DL_{CO}が低下しており、症状、機能からCOPDだと考えられた。抗コリン吸入薬 (LAMA) とβ2刺激薬 (LABA) による治療を行ったところ、治療後は肺面積の変化率も大きくなった。

間質性肺疾患での検討

本検討では、胸部X線動態解析を行った233例のうち、間質性肺疾患の40例を対象にした。特発性肺線維症 (IPF) や強皮症、進行性線維化を伴う間質性肺

疾患が中心で、肺活量 (VC) の低下や拘束性の機能障害があり、DL_{CO}は平均38.3%と非常に低い集団である。その肺面積変化率と肺気量分画、強制呼出曲線の関係を見ると、閉塞性換気障害と同様、有意に相関し、残気率 (RV/TLC) との相関も認められた (表2)。また、%VCを軽症が80%以上、中等症が65~80%未満、重症が65%未満として層別化すると、閉塞性換気障害の場合と同様、中等症、重症になると値が低くなり、VCの低下に伴って肺面積変化率も低下した。

なお、間質性肺疾患20例で、肺面積変化率と6分間歩行距離の関係を検討したところ、変化率の低い方が歩行距離も短く、相関が認められた。このことから、胸部X線動態解析による運動耐容能の評価が可能であることが示された。

まとめ

閉塞性換気障害における肺面積変化率は、気流制限や肺過膨張を反映している。また、間質性肺疾患における肺面積変化率の低さは、VCや運動耐容能を反映している。以上のことから、胸部X線動態解析は新たな呼吸機能評価法としての臨床的有用性が期待される検査である。今後は各疾患のタイプや病期分類など、より詳細な解析を行うための検討が必要であり、そのための人工知能 (AI) の応用も期待される。

表1 閉塞性換気障害での検討

閉塞性換気障害患者における肺面積変化率 (Rs) と肺気量分画、強制呼出曲線との関係 (n = 118)		
	r	p
VC (% pred.)	-0.29	<0.01
FVC (% pred.)	-0.28	<0.01
FEV ₁ (% pred.)	-0.33	<0.01
FEV ₁ /FVC	-0.19	0.04
MMF (% pred.)	-0.26	<0.01
FRC (% pred.)	-0.14	0.12
RV (% pred.)	0.31	<0.01
TLC (% pred.)	-0.01	0.93
RV/TLC ratio	0.48	<0.01
DL _{CO} (% pred.)	-0.12	0.18

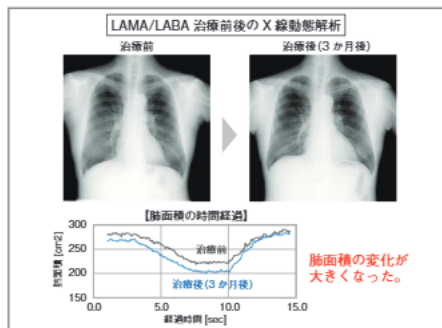


図1 症例：53歳、男性のCOPD患者

表2 間質性肺疾患での検討

間質性肺疾患患者における肺面積変化率 (Rs) と肺気量分画、強制呼出曲線との関係 (n = 40)		
	r	p
VC (% pred.)	-0.43	<0.01
FVC (% pred.)	-0.43	<0.01
FEV ₁ (% pred.)	-0.32	0.04
FEV ₁ /FVC	0.09	0.56
MMF (% pred.)	-0.06	0.70
FRC (% pred.)	-0.16	0.32
RV (% pred.)	0.01	0.94
TLC (% pred.)	-0.19	0.23
RV/TLC ratio	-0.39	0.01
DL _{CO} (% pred.)	-0.27	0.11

X線動態撮影を用いた気管径評価の臨床的有用性検討

園田 明永

滋賀医科大学放射線医学講座



X線動態撮影では気管の動きをダイレクトに観察できることから、吸気・呼気時で気管が激しく動く気管軟化症や Excessive Dynamic Airway Collapse などの換気障害の患者を、簡便にスクリーニングできる手段になりうると考えられる。本講演では、X線動態撮影を用いた気管径評価についての研究を紹介する。

研究方法

当院で胸部外科手術を受ける予定の患者の中から、書面で同意を得た52名が研究に参加した。X線動態撮影は仰臥位で行った。患者には音声ガイダンスに沿って努力呼吸をしてもらい、最大吸気時から呼気、吸気までの15秒間を15fpsで撮影した。

検証結果

検証1：換気障害のタイプによる気管狭窄の程度の違い

52名の患者のうち、他院で呼吸機能検査をした7名と混合性換気障害1名を除外し、正常28名、閉塞性換気障害12名、拘束性換気障害4名を対象とした。呼気開始時の気管（最拡張部）と呼気終了時の気管（最狭窄部）について、胸鎖関節部よりも尾側、気管分岐部よりも1椎体頭側の間で径を計測した。

その結果、閉塞性換気障害群は正常群や拘束性換気障害群に対して有意に気管径が狭小化した（図1）。閉塞性換気障害群は、呼気時に気管が狭小化する傾向が強いと考えられた。

検証2：測定者間での差の有無

3名の測定者が、呼吸機能検査結果を知らない状態で、正常28例と閉塞性換気障害12例について呼気開始時の気管（最拡張部）と呼気終了時の気管（最狭窄部）の径を手動的に計測した。

その結果、測定者間で結果に大きな差はなく、検証1と同様に閉塞性換気障害群は呼気時に気管が狭小化する傾

向にあった。そのため、X線動態画像では閉塞性換気障害を検出できる可能性があると考えられる。

検証3：測定誤差の影響の低減

呼吸中に細かく変化する気管径の測定誤差の影響を小さくするため、平均値での評価を行った。測定位置は、Th2と気管支分岐部の中間とした。閉塞性換気障害4名、正常4名をランダムに選択し、15秒間（1名あたり225フレーム）の気管径を手動的に測定した。得られたデータから呼気開始時と呼気終了時および前後7フレーム（計15フレーム）の平均で気管径の変化率を算出した。その結果、閉塞性換気障害があることで気管径の変化率が小さくなる傾向が確認できた。

なお、従来のX線撮影で最大吸気時および最大呼気時を撮影すれば、同じ結果が得られるのではないかと疑問があるが、横隔膜の動きと気管の動きは必ずしも一致せず、また動的な呼吸状態はより強い気管狭窄をもたらすといった報告もあることから、動態で気管を観察することで、より鋭敏に気管の変化を評価できると考えられる。

検証4：気管径の変化と呼吸機能の値の関係性

正常28名、閉塞性換気障害12名を対象に、気管径の変化率と呼吸機能との間に関連があるかを検証した。音声ガイ

ダンス呼気開始時と終了時の前後7フレームの気管径の変化率を測定した。検討では、対象を気管径が狭小化する群と狭小化しない群で分けた。本研究では気管径が70.7%以下となる場合に狭小化と規定した。

その結果、呼吸機能検査項目のうち、特に1秒率（FEV1%）、V50、V25の値が、有意差をもって気管径の変化と関連していた（図2）。気管径の狭小化率は、1秒量（FEV1）、FEV1%、V50、V25などの呼吸機能検査値と相関する可能性があり、気管径評価で呼吸機能検査値に異常を持つ患者の洗い出しができることも期待される。

まとめ

現時点ではデータ量が少なく、結論づけるだけの結果を得られていない。また、手動的に測定しているため精度や測定労力の限界がある。気管径の狭小化程度と閉塞性換気障害の重症度の関連についても検討する必要があるだろう。

X線動態撮影では、呼気時に生じる気管径の狭小化を動的に観察でき、気管の動きを観察・測定することで閉塞性換気障害の患者を同定し、重症度などを評価できる可能性もある。気管径をより客観的に、効率良く測定・評価できるソフトウェアの開発が、われわれの目の下の検討課題である。

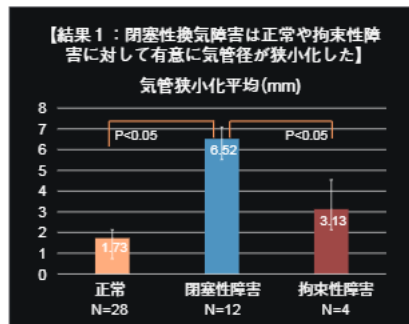


図1 検証1：換気障害のタイプによる気管狭窄の程度

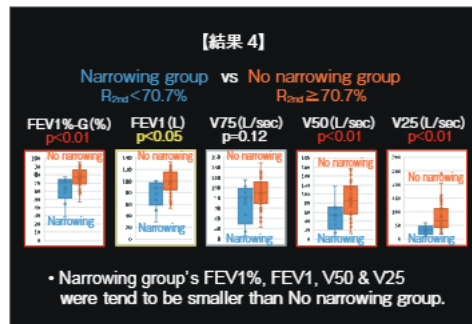


図2 検証4：気管狭小化の有無と呼吸機能検査値の関係

胸部X線動態撮影の撮影法

由地良太郎

東海大学医学部付属八王子病院診療技術部放射線技術科



当院では、2018年1月にコニカミノルタのX線動画撮影システムの第1号機を導入し、臨床研究を開始した。本講演では、システムの概要や、胸部X線動態撮影の実際の流れやポイントを報告する。

一般撮影から動態撮影への進化

X線動画撮影システムでは、通常のX線写真に時間軸が加わることで、空間分解能に加え時間分解能を持つX線写真(動画)を作成することが可能となる。

診療放射線技師の仕事も「写真を撮影する」から「動画を撮影する」に変わってきている。従来の一般撮影と比較し、動態撮影では患者の病態を表現するために、適切なポジショニングや、検査に対する患者の理解・協力がより求められる。

また、機能検査になりうることから検査を複数回行うことがあるが、再現性の高い検査を行えることが重要である。

X線動画撮影システムの概要と検査の流れ

X線動画撮影システムは、コニカミノルタのX線動画解析ワークステーション「KINOSIS」と可搬型デジタルX線撮影

装置「AeroDR fine」、島津製作所の一般撮影装置「RADspeed Pro」で構成されている。一般撮影装置の付帯機能として連続撮影を可能としており、パルスX線を1秒間に15回連続照射し、得られた画像を連続表示することで動画として表示される。この動画の空間分解能は400 μ m、濃度分解能は16bitである。

通常の一般撮影の手順は、患者確認・説明、撮影条件の設定、ポジショニング・撮影、画像が適正に撮影・処理されているかを確認し、依頼医に提供する。加えて、胸部X線動態撮影では、検査前により詳しい撮影法および検査目的の説明や、動態を邪魔しないポジショニング、最大吸気・呼気が得られる呼吸の練習が必要となる(図1)。患者の協力を得るためには事前説明が特に重要であり、当院では検査案内のリーフレットを作成し、検査前に読んでもらっている。

ポジショニングは、呼吸に使用する筋肉を緊張させないために肩甲骨を抜かず、楽な姿勢で取手をつかみ、上腕筋に力が入らないよう前腕と手首の高さは水平としている。また、体動防止のため骨盤部をベルトで固定している(図2)。

検査の再現性を向上するため、呼吸指示はオートボイスを使用している

(図3)。また、撮影室内で呼吸練習のためにオートボイスの音声を動作することができ、これにより、診療放射線技師が患者の近くで、音声の聞こえ方や患者の体動を確認することができる。なお、放射線技術科内で撮影開始のタイミングを統一することで、現在、技師による差はほとんど見られない。

被ばく線量(入射表面線量)は、1パルス線量 $\times$ 15fps $\times$ 撮影時間(秒)で求められる。当院の場合、撮影時間は平均16.6秒、被ばく線量は平均1.82mGyと、国際原子力機関(IAEA)の胸部正面+側面のガイダンスレベルである1.9mGyよりも低い値となっている。また、当院の低線量肺がんCT検診よりかなり少ない被ばく線量での検査が可能である。

胸部X線動態撮影の手順については、当院とコニカミノルタの監修によるマニュアルを作成し、検査の一貫性が保てるようにしている。これにより、当院における患者の呼び出しから退室までの平均検査時間は4.9分となっている。

まとめ

患者用のリーフレットや撮影マニュアルを完備したことで、再現性の高い検査が可能であり、当院では胸部X線動態撮影に即時対応可能な体制を実現している。また、X線動画撮影システムは、今後、胸部はもとより整形領域でも威力を発揮することが期待される。

診療放射線技師にも呼吸生理学への理解をはじめ、新たな役割が求められており、技師の腕が試されるモダリティの一つであると考えられる。

説	患者確認・説明 + 動態撮影の説明 + 検査の目的の説明	患者間違いや部位間違いの防止 偽像や障害陰影の防止
条	撮影条件 + 撮影条件の決定	撮影距離、管電圧、mA、mAs AECの使用の有無
ポ	ポジショニング + 動態を邪魔しない整位 + 動きの練習	画像の確認、再現性の重要性 撮影条件の可否
画	撮影画像の適性	画像処理の適性 画像サイズの決定

図1 胸部X線動態撮影の手順



図2 ポジショニングのポイント

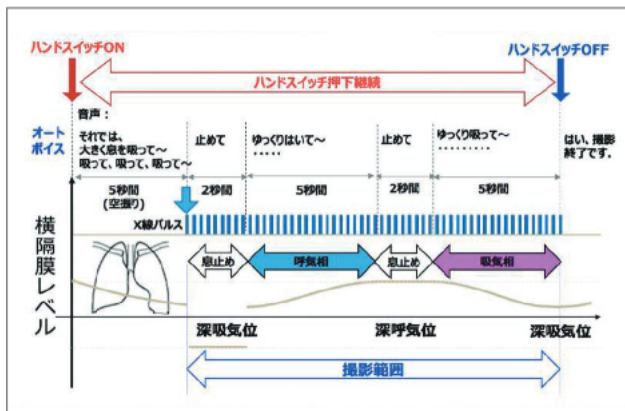


図3 オートボイスによる呼吸指示の流れ

COPD, 換気障害症例を中心に

坂巻 文雄

東海大学医学部医学科内科学系呼吸器内科学領域 / 東海大学医学部付属八王子病院呼吸器内科



当院では、コニカミノルタのX線動画撮影システムを用いて、2019年10月までに100例近くの撮影を行っている。本講演では、慢性閉塞性肺疾患 (COPD) 症例における胸部の動きの検討結果と、症例報告としてCOPDおよび肺胞低換気症候群における本システムの有用性と可能性について報告する。

COPD 症例における胸部の動きの検討

1. 背景, 目的

COPDでは、肺の過膨張により横隔膜が平低化することが知られており、横隔膜の奇異運動や動きの悪化が報告されている。一方、重症COPDでは、古くから胸部下部の肋骨の動きの異常 (Hoover's sign) が知られているが、動きについての定量的検討は少ない。そこで、COPD疑いの31症例に対し、胸部X線動態画像から後方肋骨の協調性や横隔膜の動きを解析し、主に肺の換気機能検査指標と比較した¹⁾。

2. 方法

呼気時・吸気時それぞれにおいて後方肋骨の胸膜直下に定点を設定し、定点の移動角度の変化を専用ソフトウェアで自動追跡して動きの方向を算出した。上-中肺野・中-下肺野・上-下肺野間の後方肋骨の動きの角度を算出し、それぞれの肋骨間の動きの類似度を比較した。

3. 結果

軽症群と重症群の後方肋骨の動きの類似度を見ると、軽症群では下方肋骨

が上・中肋骨と異なる方向に動くのに対し、重症群ではすべて同一方向に動いていた。一方、横隔膜の動きに気流制限による差は認められなかった。また、気流制限を示す指標 [%1秒量 (%FEV1)] と類似度との相関が認められた。以上より、胸部X線動態画像によって、COPDの重症度を視覚的かつ客観的に評価できる可能性があると考ええる。

症例提示

症例1: COPD重症例 (経過観察例)

本症例は、2018年に症状の増悪による入院を3回繰り返し、呼吸困難と気流制限は高度で、GOLDの重症度分類はDと、きわめて重症である。LABA/LAMA配合薬と吸入ステロイド薬 (ICS) を中心に加療し、2019年に入り安定傾向となった。

胸部X線動態画像では、肺は過膨張気味で、やや滴状心であるが、1秒量 (FEV1) は時間の経過とともに若干回復していた。後方肋骨の動きに経時的な変化は見られないが、横隔膜の変位グラフ (図1) を見ると、3回目入院時は左右のアンバランスやCOPD特有の揺れもなく、スムーズに上下している。横隔膜の変位から肺機能の改善効果が確認できる可能性が期待される。

症例2: 中等症~重症のCOPD例

本症例は、%FEV1が約53%、増悪による入院が一度と息切れがあり、中等症~重症である。胸部X線動態画像のFE-MODE (周波数強調処理) では、重

症例に多く見られる呼気時の気管攣縮が確認できる。

症例3: 肺胞低換気症候群 (経過観察例)

本症例は、他院にて特発性肺動脈性肺高血圧症と診断されたが、換気機能検査の結果からII型呼吸不全と考えられた。胸部X線動態画像で認めた横隔膜の可動性の低下は、高炭酸ガス血症の原因として否定できないため、睡眠時に非侵襲的陽圧換気療法 (NPPV) を行ったところ、自覚症状が改善した。

努力肺活量 (FVC) に経時的な変化は見られないが、最大吸気量 (IC) は0.99Lから1.06Lまで上昇していた。さらに、PL-MODE (基準フレーム比計算処理) 画像にて換気の改善が確認でき (図2), 息切れ指標 (mMRC) も改善していた。また、PH-MODE (相互相関計算処理) で肺血流の改善が見られた。胸部X線動態画像は、換気評価の一つの指標になりうると考える。

まとめ

COPDおよび肺胞低換気症候群においては、胸部X線動態画像にて後方肋骨や横隔膜の運動の定量評価を行うことで、重症度評価や経時的観察の指標となりうる。また、胸部の動きや中枢気道の虚脱、換気の不均等、肺循環障害の視覚的評価も可能となると考える。

●参考文献

1) 高橋玄樹・他, 日本呼吸器学会誌, 8 (Suppl.): 262, 2019.

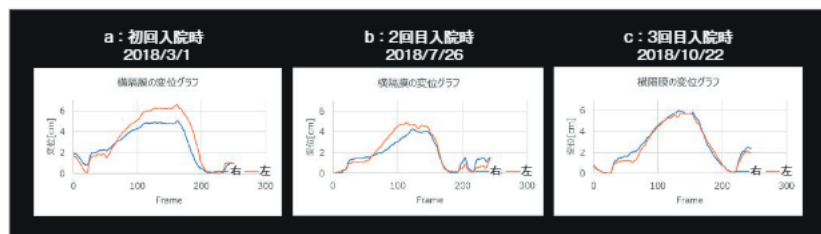


図1 症例1: 横隔膜の変位

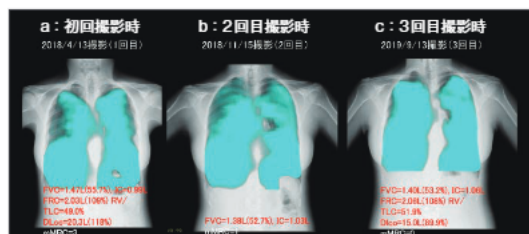


図2 症例3: 肺胞低換気症候群のPL-MODE画像

慢性呼吸器疾患への応用の検討

二階堂雄文

福島県立医科大学呼吸器内科学講座



当施設では、慢性肺血栓塞栓症に対する肺血流の評価目的に胸部X線動態撮影を導入した。さらに、最近では慢性呼吸器疾患への応用も試みている。本講演では、初期検討として、間質性肺炎および巨大ブラのある肺気腫の症例を提示する。

間質性肺炎への応用

症例1は、77歳、男性、特発性間質性肺炎である。呼吸機能と肺活量（VC）は正常範囲内で、軽度の肺拡散能力（DL_{CO}）の低下はあるが、ほぼ呼吸機能は保たれている。低酸素血症もないが、間質性肺炎の血清マーカーは高値であった。

胸部単純X線写真では、びまん性の網状影、すりガラス状陰影と、左肺にやや換気の低下が見られた。CTでは、気腫性変化とともに胸膜側にびまん性の網状影を認め、ややすりガラス状陰影が多く、特発性間質性肺炎というよりは、ATS/ERS/JRS/ALAT国際診断ガイドライン¹⁾のAlternative Diagnosis（囊

胞・すりガラス状陰影優位とも取れる陰影）に分類される症例と考えられた。

胸部X線動態画像による換気能評価では、左肺の換気量が低下しているが、下葉の病変はそれほど強くなく、体位による変化もほぼ認めなかった（図1）。次に、気流速度解析画像は、呼気速度、吸気速度、速度比（吸気・呼気）を色分けし、画像に重ねて表示する。速度に応じて赤（高速）～青（低速）とし、速度比については赤・黒（高速）～青（低速）としている。データ欠損部分は空白となる。本症例の安静呼吸時の速度比は、立位と比べて臥位で亢進しており（図2）、深呼吸時にはさらに亢進していた（図3）。

肺気腫への応用

症例2は、64歳、男性、巨大ブラのある肺気腫である。繰り返す気胸歴があり、2001年に左側、2008年に右側のブラ縫縮術が施行された。その後、2017年頃に呼吸困難の悪化を自覚し、2019年に呼吸困難の増悪と気腫性変化が著明となり、

当科を紹介受診。評価のため、胸部X線動態撮影を施行した。

胸部単純X線写真では、両側中肺を中心に巨大ブラと透過性亢進を認めた。呼吸機能検査では閉塞性換気障害を認め、フローボリューム曲線も典型的な閉塞性障害パターンを呈していた。CTでは上葉にも気腫性変化が著明で、中葉、下葉にも両側に巨大なブラと、下葉に気腫性変化が認められた。

胸部X線動態画像による換気能評価では、特に中肺のブラに応じて換気量が低下していた（図4）。気流速度解析画像では、安静呼吸時には体位による速度比の亢進は認められず（図5）、深呼吸時に速度の低下が認められ（図6）、間質性肺炎とは異なる様相を呈していた。

まとめ

当施設では、胸部動態X線画像を慢性呼吸器疾患、特に慢性閉塞性肺疾患（COPD）や間質性肺炎における肺の局所・換気・血流の評価に用い、病態や

進行における新たな有用なパラメータが得られることを期待し、症例の蓄積を開始している。今後は、登録時（入院時）のさまざまな情報・検査項目や新たなバイオマーカーなどの関連と、疾患進行との関係についても評価していきたい。

●参考文献

- 1) Raghu, G., et al., *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 198 (5): e44-e68, 2018.

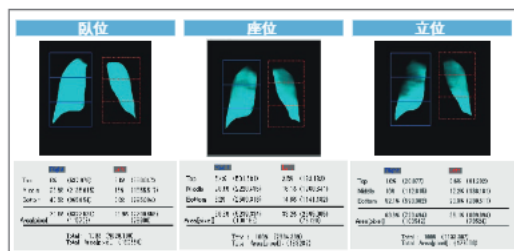


図1 症例1（間質性肺炎）：換気能評価画像

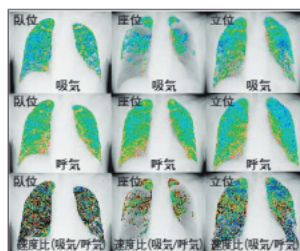


図2 症例1：安静呼吸時の気流速度解析画像

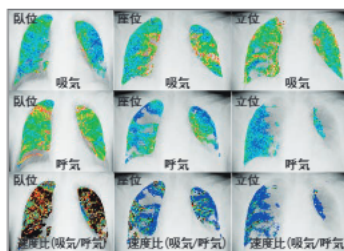


図3 症例1：深呼吸時の気流速度解析画像

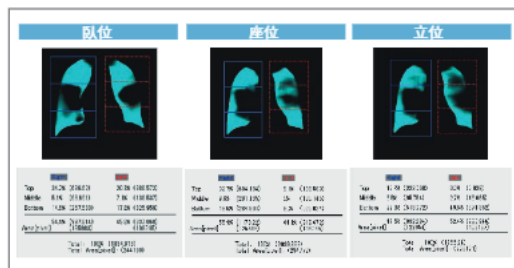


図4 症例2（肺気腫）：換気能評価画像

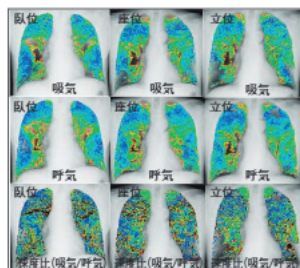


図5 症例2：安静呼吸時の気流速度解析画像

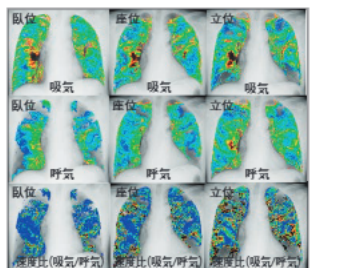


図6 症例2：深呼吸時の気流速度解析画像

間質性疾患の動き

上山 維晋

天理よろづ相談所病院呼吸器内科



本講演では、間質性肺炎 (IP) における胸部X線動態撮影の有用性について、症例を提示して報告する。

症例1：下肺野優位のIP

症例1は、68歳、女性、下肺野優位のIPである。2018年9月から咳嗽が出現し、12月に近医にてIPを指摘され、2019年1月に当科を受診した。現在、無治療経過観察中。元喫煙者 (20本/日×30年) で、既往歴は腎疾患、虫垂炎、子宮付属器炎、静脈瘤である。血液検査の結果は、抗核抗体 (ANA) : 640倍、抗セントロメア抗体 : 陽性、KL-6 : 1082 U/mL、SP-D : 362.1 ng/mL であり、また、呼吸機能検査の結果は、肺活量 (VC, % VC) : 2.19 L の 88.2%, 肺拡散能力 (% DLCO) : 71.9%であった。

胸部単純X線写真では、下肺野優位に網状影、すりガラス状陰影が認められる。単純CT画像 (図1) では、上肺野ほどの陰影はないが、下肺野には気管支血管側周囲から胸膜下にかけて網状影、す

りガラス状陰影が認められ、膠原病肺が疑われる。胸部X線動態画像 (図2) では、正常例と比べて下肺野および胸郭の幅の動きが悪い印象であった。また、胸部X線動態画像の呼気時から吸気時にかけての変位をベクトル表示した画像 (図3) を見ると、当院の正常コントロール例と比較して下肺野の動きが悪い印象である。

症例2：上肺野優位のIP

症例2は、65歳、女性、上肺野優位のIPで、主訴は運動時発作的呼吸困難 (DOE) である。2001年に健診で初めて胸部単純X線写真の異常が指摘され、2012年の健診で再度異常が指摘されたことで前医を受診した。2017年7月頃からDOEが出現、2018年2月に当科を受診し、クライオバイオプシーを施行した。非喫煙者で、既往歴は小児喘息、虫垂炎、子宮筋腫である。血清学的には優位な陽性所見は認められず、KL-6 : 739 U/mL、SP-D : 829.5 ng/mL であった。また、呼吸機能検査の結果は、VC (% VC) : 1.91 L (74%),

% DLCO : 63.1%であった。

胸部単純X線写真では、上肺野優位の網状影、浸潤影が認められる。単純CT画像 (図4) では、上肺野に強い網状影とコンソリデーションが認められた。胸部X線動態画像 (図5) では全体的に動きが悪く、横隔膜の動きも不自然で、側面像では肺の下葉が呼吸を支えているという印象である。変位のベクトル表示画像 (図6) でも肺野全体の動きが悪い印象であった。

IPに対する胸部X線動態撮影の現況と今後の検討課題

当院では、IP中心で胸部X線動態撮影を実施しており、これまでに30~40症例のデータが得られている。全例において正面像と側面像を撮影しており、それらから得られる推定肺野容積と呼吸機能検査の結果を比較したところ、良い相関が得られている。現状では、経過観察症例は安定した1例のみであり、過去と現在の画像比較においては同様の結果が得られているが、悪化した症例の経過観察や、予後との相関、検出精度については今後の検討課題である。

さらに、IPにおける動きの特徴として、下肺野優位の症例では下肺野の動きおよび胸郭の動きが悪く、上肺野優位の症例では全体的に動きが悪いという印象がある。また、いずれの症例も胸郭の動きは上部の方が下部に比べて良好な傾向が見られた。これらについては、まだ定量的な解析を行っていないが、IPのサブタイプによる動きの違いについても、今後検討していきたい。

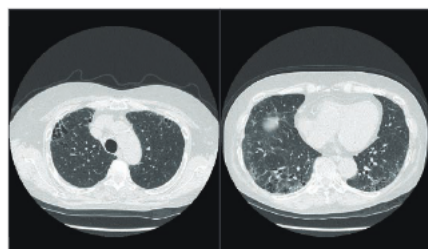


図1 症例1：胸部単純CT画像

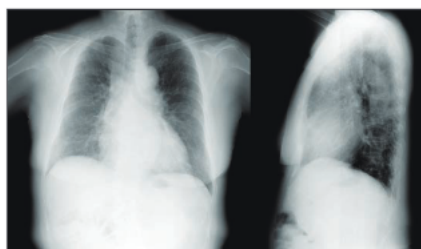


図2 症例1：胸部X線動態画像

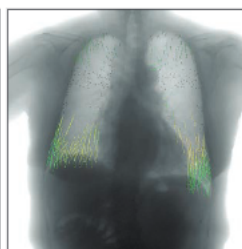


図3 症例1：変位のベクトル表示画像

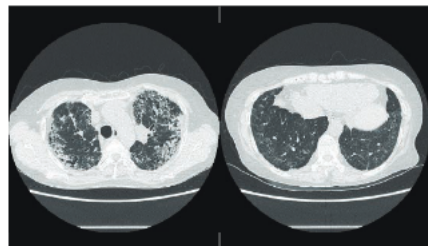


図4 症例2：胸部単純CT画像

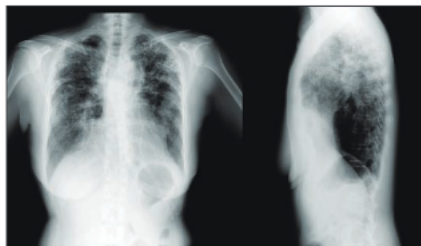


図5 症例2：胸部X線動態画像

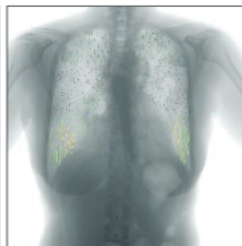


図6 症例2：変位のベクトル表示画像

X線動態撮影による肺血流評価

山崎 誘三

九州大学大学院医学研究院臨床放射線科学分野



本講演では、胸部X線動態撮影による肺血流イメージングについて、2症例を提示する。

症例1：慢性血栓塞栓性肺高血圧症 (CTEPH)

症例1は、69歳、女性。2019年1月頃に労作時息切れを主訴に他院を受診し、肺血栓塞栓症 (PE) と診断された。抗凝固療法を施行したが症状が残存し、慢性化が疑われたため、当院にて胸部X線動態撮影を行った。

胸部単純X線写真 (図1 a) では明らかな異常は認められなかったが、右肺のX線肺血流イメージング (図1 b) では、両肺野に区域性の欠損が多発していた。^{99m}Tc-MAA肺血流シンチグラフィ (図1 c) では、CTEPHに特徴的な区域性の欠損が多発しており、X線肺血流イメージングの所見とも一致していた。造影CTのヨードマップ (図1 d) においても同様の所見であった。右心カテーテル検査の結果、平均肺動脈圧は43mmHgであり、CTEPHと診断された。肺高血圧症 (PH) は、①肺動脈性肺高血圧症 (PAH)、②左心疾患によるPH、③呼吸器疾患および/または低酸素血症によるPH、④CTEPH、⑤原因不明および/または複合的要因によるPHの5つに分類され、診断ではこれらを鑑別する。

CTEPHは、6か月以上の抗凝固療法で溶解しない肺動脈内の器質性血栓があり、平均肺動脈圧は ≥ 25 mmHg (正常値は < 20 mmHg) と定義されている。PHとPEの2つの側面を持ち、明らかな肺塞栓症の既往がないままにPHを契機として見つかることもある。

最近提言されているPHの診療アルゴリズム¹⁾では、肺換気血流シンチグラフィによるCTEPHのスクリーニングを、早期に行うことが重要視されているが、胸部X線動態撮影による肺血流イメージングは将来、肺換気血流シンチグラフィ

の前に行うスクリーニング検査としての位置づけを担っている可能性があると考えている。

また、別のCTEPH症例の術前・術後の肺動脈造影画像とX線肺血流イメージングを比較すると、術後に血流が回復している様子が同様に描出されており、X線肺血流イメージングは治療後の肺血流の評価への活用も期待される。

症例2：巨細胞性動脈炎、左肺動脈高度狭窄

症例2は、74歳、男性。呼吸困難と咳嗽を主訴に前医を受診し、肺炎との診断で抗生剤加療後にも症状が維持したため、当院にて胸部X線動態撮影を行った。胸部単純X線写真 (図2 a) では、右の肺血管が拡張しているのに対し、左の肺血管の描出は少ない印象であった。X線肺血流イメージング (図2 b) では、左肺の血流が極端に乏しいことがわかる

一方、X線肺換気イメージング (図2 c) では、両肺とも均一に換気されていた。肺換気血流シンチグラフィおよび造影CTのヨードマップ (図3) では、同様の所見が得られた。造影CTでは、左肺動脈主幹部が高度に狭小化して周囲に軟部影が広がっており、肺動脈3D画像でも左肺血管の描出が乏しかった。FDG-PET/CTでは、造影CTの軟部影に一致してSUVmax = 7.6の高集積が見られ、これらの結果を踏まえて、巨細胞性動脈炎による左肺動脈高度狭窄と診断された。

胸部X線動態撮影を行うことで、換気・血流に関する情報を簡便に取得することができ、造影CTやシンチグラフィが気軽に利用できない状況においても有用であると思われる。

●参考文献

- 1) Frost, A., et al. : Diagnosis of pulmonary hypertension. *Eur. Respir. J.*, 53 (1): 1801904, 2019.

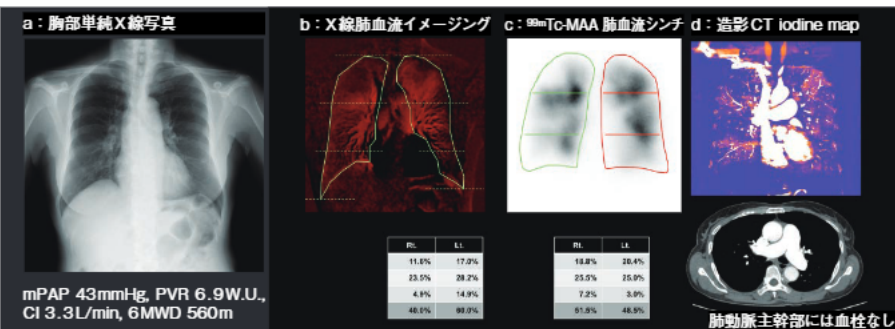


図1 症例1：慢性血栓塞栓性肺高血圧症 (CTEPH)

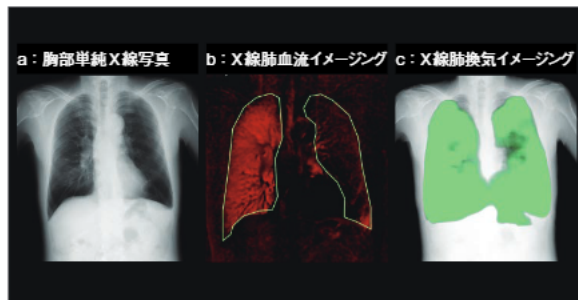


図2 症例2：巨細胞性動脈炎、左肺動脈高度狭窄

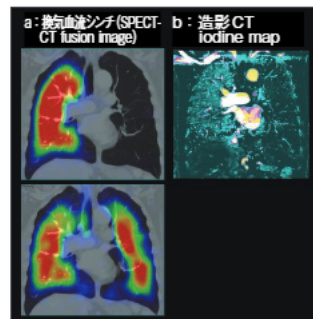


図3 症例2の肺換気血流シンチグラフィおよび造影CTのヨードマップ

総 評

工藤 翔二 公益財団法人結核予防会理事長 / 日本医科大学名誉教授



2018年の第1回X線動態画像セミナーから、わずか1年で研究内容が非常に進歩したことに驚いている。全国で研究を進めていただいた先生方には、心から敬意を表したい。

今回の発表や活発なディスカッションを通じて、特に印象的だったことを3点挙げたい。まず1番目に、X線動態画像開発のきっかけともなった血流と換気との分離による血流と換気の可視化や、肺血栓塞栓症の検出といったことの実現の可能性が高まったと感じた。換気・血流シンチグラフィと比べるとそれぞれ特徴はあるものの、同等あるいは代替できる可能性もあると考えられる。何より、検査コストが安価で、中小病院でも実施できることから、臨床で広く活用できる。課題はあるものの、換気・血流シンチグラフィと肩を並べるところまで来ているとの報告も複数あり、これからの研究の発展が期待される。

2番目に、応用の広がりが感じられた。X線動態画像の開発当初は、対象疾患として慢性閉塞性肺疾患（COPD）や間

質性肺炎くらいしか思い浮かばなかったが、今回は、肺胞低換気症候群や慢性血栓塞栓性肺高血圧症といったさまざまな疾患に対する応用の症例提示があり、また、横隔膜ペーシングとの関係の検討なども報告された。応用が広がっていることは、大変新鮮で、かつ重要なことだと感じた。

3番目として、肺面積変化率や気管径、後方肋骨など、新しい着目点が提起されたことがある。メーカー情報提供で紹介された「動きのアトラス構想」では、「動的な画像には、肺胸郭内にはきわめて多くのランドマークがある」ということを、重要なメッセージと受け取った。どこに着目するかは、関心を持った先生方がそれぞれ取り組んでいくものと思うが、非常に多くのランドマークが存在することは大切なポイントである。思い起こされるのは、私が最初に胸部単純X線写真を学んだ教科書“Felson's Principles of Chest Roentgenology”である。初版は1965年に発行されたが、X線が発見された1895年から70年が経過して、

ようやく「シルエットサイン」が提起されたことになる。それを思うと、ランドマークが多いというのは宝の山を目の前にしているようなものであり、時間が経っても新しい発見がある可能性がある、私は感じている。

現在、X線動画撮影システムは、全国17施設に導入されている。中小病院でも検査を行えるというメリットがあるX線動画撮影システムは、最終的には本邦での保険収載をめざしていくべきだと考えるが、一方で、アジア地域など途上国への展開も期待される。シンチグラフィ検査を容易に行えない途上国で、X線動態撮影は活用できるであろう。簡便に検査が行えるという点では、震災や水害など近年多発する災害時においても、避難所でエコノミー症候群を簡単にスクリーニングできる可能性もあり、用途はこれから広がっていくと考えられる。次回以降のセミナーではどのような発表があるか想像できないが、非常に楽しみにしている。

第2回 X線動態画像セミナー

日 時：2019年11月2日（土）
場 所：フクラシア八重洲A会議室



第1部/第3部座長：
黒崎敦子 氏
（結核予防会複十字病院）



第2部座長：
笠原寿郎 氏
（金沢大学）



第3部座長：
長谷部光泉 氏
（東海大学）

