



KONICA MINOLTA

Giving Shape to Ideas

X線動態画像 セミナー

日時：2018年10月13日（土）
14：00～17：30

会場：JPタワー 14F コニカミノルタ（株）
bizhub SQUARE

コニカミノルタ ジャパン株式会社

X線動態画像 セミナー

CONTENTS

この冊子は2018年10月13日(土)
に開催されたX線動態画像セミナーを
まとめたものです。

第1部 基調講演

呼吸器画像診断の常識を変えるX線動態画像 ——形態を写す静止画像と生理学を反映する動的画像…………… 03

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

第2部 RSNA 2016受賞講演

Certificate of Merit

Dynamic Chest Radiography Using Flat Panel Detector System: Technique …………… 04

田中 利恵 金沢大学医薬保健研究域保健学系

Magna Cum Laude

Dynamic Chest Radiography Using Flat Panel Detector System: Clinical Usefulness …………… 05

山田 祥岳 慶應義塾大学医学部放射線科学教室(診断)

第3部 臨床研究報告

当院における胸部動態撮影の進捗 …………… 06

坂巻 文雄 東海大学医学部付属八王子病院呼吸器内科

胸部X線動態画像を用いた 呼吸機能評価方法の検討 …………… 07

大倉 徳幸 金沢大学附属病院呼吸器内科

胸部X線動態解析の肺切除術での活用 …………… 08

田村 昌也 金沢大学附属病院呼吸器外科

胸部X線動態解析による手術適応評価 …………… 09

花岡 淳 滋賀医科大学医学部附属病院呼吸器外科

第4部 ディスカッション

動画X線画像が持つ臨床価値とその将来性 ～各専門領域から～ …………… 10

座 長

黒崎 敦子氏 公益財団法人結核予防会 複十字病院放射線診療部放射線診断科

長谷部光泉氏 東海大学医学部付属八王子病院画像診断科

コメンテーター

柴田 陽光氏 福島県立医科大学呼吸器内科学講座

谷 徹氏 滋賀医科大学革新的医療機器・システム研究開発講座

髭谷 満氏 公益財団法人結核予防会 複十字病院呼吸ケアリハビリセンターリハビリテーション科

織田 弘美氏 埼玉医科大学病院病院長

呼吸器画像診断の常識を変えるX線動態画像

—形態を写す静止画像と生理学を反映する動的画像

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



本講演では、呼吸器画像診断の歴史を踏まえ、今までの常識を変える胸部X線動態画像の可能性と期待について述べる。

呼吸器診断学の歴史

呼吸器診断学の先人たちは、解剖せず肺の中を知る方法を模索し、1761年の打診法の開発、1816年の聴診器の発明へとつながった(図1)。そして、1895年のX線の発見により胸部画像診断が始まるが、1920年代には相当に普及していたことがうかがえ、胸部単純X線写真が呼吸器診断において重要な役割を担うようになった。

胸部画像診断は、形態をより細かく見たいという要望に応じて、胸部単純X線写真から胸部CT、高分解能CTへと発展してきた。高分解能CTでは肺の二次小葉の構造まで分析できるようになり、さらに高分解能化が進んでいる。“形態を反映した”，より高精細な画像へと発展してきたのが、呼吸器画像診断の歴史の基本的な流れである。

肺循環への重力の影響と静的画像

一方で、胸部単純X線写真には“生理学を反映する”要素もある。重力の影響を受ける肺は、立位撮影において、健常者では肺門より上方の血管は視認しにくく、これに関しては、J. B. Westが

1962年に著した教科書において、静水圧のモデルを用いて説明がなされている¹⁾(図2)。

静的な画像において、例えばうつ血性心不全に陥ると、上行する血管も視認できるようになり、生理学的情報を反映した情報も含まれていることがわかる。

胸部X線動態画像の印象

コニカミノルタから初めて胸部X線動態画像の紹介を受けた際の印象は、まず、当然ながら換気とともに動いており、心臓の拍動や横隔膜の動きがよくわかった(図3)。そして、立位撮影であるため重力の影響を受けた生理的情報を反映し、吸気と呼気で濃度が変わる画像を得られる。これらの特徴から、換気と血流の分離ができるのではないかと考えた。

呼吸生理学で特に重要となるのが、ガス交換の生理学である。J. B. Westの教科書に掲載された“立位で測定された換気血流比(\dot{V}_A/\dot{Q}_C)”のマッピングは、過去55年間にわたり呼吸生理学のcentral dogmaとしてあり続けているが、これまで誰も検証することができなかった。しかし、X線動態画像により、この検証ができる可能性があると考えられる。

胸部X線動態画像への期待

胸部X線動態画像による横隔膜や胸

郭の動きの可視化は、呼吸リハビリテーションの効果測定や横隔神経麻痺、慢性閉塞性肺疾患(COPD)の診断に有用である^{2), 3)}ほか、立位で血流分布と換気分布を観察することで、血栓性肺疾患、COPDの局所分布異常、うつ血性心不全、などの診断が可能になるだろう⁴⁾。

胸部X線動態画像は、日本発の技術であり、論文も日本から出始めている今、世界に先駆けて日本が一挙にリードしていくべき領域であると考ええる。

●参考文献

- 1) West, J. B. : Regional differences in gas exchange in the lung of erect man. *J. Appl. Physiol.*, **6**, 893 ~ 898, 1962.
- 2) Yamada, Y., Ueyama, M., Abe, T., et al. : Time-Resolved Quantitative Analysis of the Diaphragms During Tidal Breathing in a Standing Position Using Dynamic Chest Radiography with a Flat Panel Detector System ("Dynamic X-Ray Phrenicography"); Initial Experience in 172 Volunteers. *Acad. Radiol.*, **24** : 4, 393 ~ 400, 2017.
- 3) Hida, T., Yamada, Y., Ueyama, M., et al. : Decreased and slower diaphragmatic motion during forced breathing in severe COPD patients; Time-resolved quantitative analysis using dynamic chest radiography with a flat panel detector system. *Eur. J. Radiol.*, **112**, 28 ~ 36, 2019.
- 4) Yamada, Y., Ueyama, M., Abe, T., et al. : Difference in the craniocaudal gradient of the maximum pixel value change rate between chronic obstructive pulmonary disease patients and normal subjects using sub-mGy dynamic chest radiography with a flat panel detector system. *Eur. J. Radiol.*, **92**, 37 ~ 44, 2017.



図1 呼吸器診断学の歴史

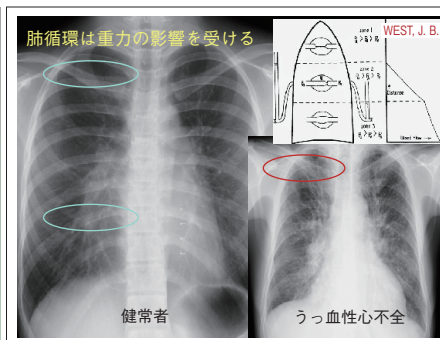


図2 肺循環への重力の影響

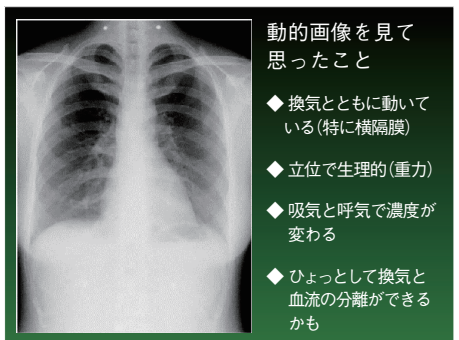


図3 胸部動態画像の印象

Certificate of Merit

Dynamic Chest Radiography Using Flat Panel Detector System : Technique

田中 利恵

金沢大学医薬保健研究域保健学系



本講演では、胸部X線動態撮影の技術的特徴およびわれわれが行った動物実験の成果について報告する。

胸部X線動態撮影の技術的特徴

胸部X線動態撮影は、低線量のX線動画撮影による新しい肺機能診断法である¹⁾。15fpsで10秒間撮影を行い、150フレームのX線写真を取得する。胸部単純X線撮影との違いとして、呼吸法が挙げられる。また、胸部X線動態撮影の被ばく線量は、国際原子力機関(IAEA)が推奨している2方向の胸部単純X線撮影の合計線量1.9mGyよりも低く抑えることができる。これは、FPDの技術進歩によって、従来技術よりも低線量での撮影が可能になったためである。コニカミノルタのFPDは、入射線量と出力のピクセル値間に高い直線性がある。これに、3～15fpsのX線パルス照射するX線発生装置を組み合わせることで、一般撮影室での胸部X線動態撮影が可能となった。

胸部X線動態撮影では、横隔膜や胸郭、肋骨、心壁の動き、呼吸・心拍動による肺野内の濃度変化などを動画像で観察できる。動画像で横隔膜運動の観察が可能になることで、可動域と動くタイミング、左右の同調性の評価を行える。また、フレームごとに肺尖部から横隔膜までの距離を計測して、呼吸による移動量や可動域、動くタイミング、同調性などをグラフ化することで、詳細な定量的評価も可能になる。

さらに、注目すべきは、胸部X線動態撮影ではX線透過性の違いによって生じる肺野内のピクセル値の変化を白黒の濃淡で表せることである。ピクセル値の変化には2パターンあり、1つは単位容積あたりの肺血管と気管支の密度変化により、肺野内が呼気では白く、吸気では黒くなる。もう1パターンは、心拍動に伴う血流動態に変化により、肺野が収縮期には白く、拡張期では黒くなる。ただし、これらを肉眼で評価するのは困

難なためデジタル画像処理を行い、換気や血流を強調したカラー画像を作成する。

動物実験による
胸部X線動態撮影の評価

われわれは、平成26～28年度ふくしま医療福祉機器(救急・災害対応医療機器)開発事業費補助を受け、滋賀医科大学、福島県立医科大学の協力を得て、ブタを用いた動物実験を行った。本実験では、①1回吸気量の増減をピクセル値で描出し、カラー強度で変化量を表現する、②人工的に無気肺をつくり、カラーで欠損部として描出する、という2テーマについて検討した。

本実験の結果として、①については、1回吸気量の上昇に合わせてピクセル値も増加し、カラー強度でそれを表現することができ、1回吸気量とピクセル値の変化量に高い相関を確認した(図1)。また、正常モデルと右肺無気肺モデルの1回換気量を比較すると、正常モデルでは左右の肺に有意差が認められないが、右肺無気肺モデルでは有意に右肺のピクセル値が減少し、正常な左肺のピクセル値が上昇した。これは、機能維持のために、正常な左肺の1回換気量が増加したのが理由だと考えられる。

②については、正常な左肺とカテーテルを用いて意図的に気道閉塞させた右肺の初期呼気相でのピクセル値を見たところ、正常な左肺のピクセル値は上昇し、閉塞した右肺のピクセル値は変化量が減少してフラットな状態になることが確認できた(図2)。また、吸気直後の初期の呼気相で気道閉塞させた場合には、閉塞している右肺が高ピクセ

ル値を保ったままフラットな状態になり、Air trappingが起こっていると考えられた。さらに、無気肺モデルでは、呼気のたびにピクセル値が上昇していくケースも確認された。これは、肺野内の過膨張をとらえていると思われ、胸部X線動態撮影はAir trappingの描出も可能であるとの結果が得られた。われわれは、肺葉ごとにも無気肺モデルでも検討を行ったが、いずれも無気肺部位のカラー強度の減少や欠損を描出できた。

これらの検討から、胸部X線動態撮影では、1回吸気量の相対的な評価が行え、肺葉単位での肺換気障害を検出できることが明らかになった。また、Air trappingと気流制限の鑑別診断も行えると考えられ、一般撮影室において造影剤を使用せずに低侵襲な肺機能診断が実現する可能性が示された。このほか、われわれは、肺血流解析の可能性についても検討し、血流に応じてピクセル値が変化して、カラーマッピングを行うことができた。

今後の展望

胸部X線動態撮影は、肺胞レベルでの肺換気ではなく、肺血管や気管支の密度変化といった相対的な肺機能を描出していることを念頭に置く必要がある。しかし、胸部X線動態撮影は、「静から動へ、形態から機能へ」と、一般撮影室で得られる診断情報を飛躍的に増やす可能性を秘めた、新しい肺機能診断技術だと言えよう。

●参考文献

- 1) Tanaka, R. : Dynamic chest radiography ; flat-panel detector (FPD) based functional X-ray imaging. *Radiol., Phys. Technol.*, **9**・2,139～153, 2016.

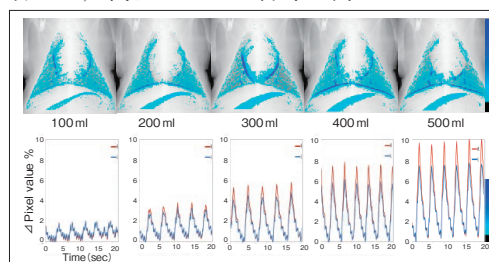


図1 右横隔膜神経麻痺による肺低換気症候群

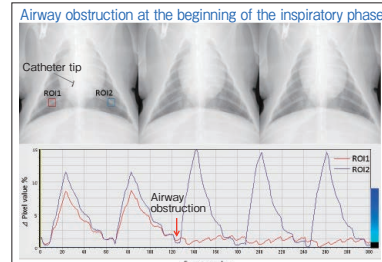


図2 横隔膜の動きの定量的比較

Magna Cum Laude

Dynamic Chest Radiography Using Flat Panel Detector System : Clinical Usefulness

山田 祥岳

慶應義塾大学医学部放射線科学教室（診断）



本講演は、胸部X線動態解析を用いた横隔膜運動の評価および換気強調画像、血流強調画像について報告する。

横隔膜運動の評価

胸部X線動態画像は、連続画像データであるため、横隔膜の動きの移動距離のほか、微分を行うことによって、横隔膜の動きの速度も評価可能となる（図1）。

健常ボランティアの検討では、172例（日本人）における安静呼吸下の横隔膜運動は右横隔膜が平均11mm、左横隔膜が平均15mmで、左横隔膜は右横隔膜と比べ有意に大きく動くという結果が得られた。また、多変量解析では、BMIとtidal volume（1回換気量）共に高い値になるほど、横隔膜の動きも大きくなった。

さらに、健常者47例と慢性閉塞性肺疾患（COPD）患者39例の横隔膜運動の比較では、安静呼吸下においてCOPD患者の方が有意に大きく動いていた。これまでの強制呼吸下で検討では、COPD患者の方が動きが小さかったが、その反対の結果となった。また、多変量解析でも、COPD患者で、BMIが高いほど、安静呼吸下での横隔膜の動きが大きいことが明らかになった¹⁾。これは、COPD患者の

場合、ガス交換機能の低下を補うため横隔膜を大きく動かしていると思われる。

われわれは、強制呼吸下での健常者とCOPD患者の横隔膜運動についても評価を行った。GOLD分類で軽症のgrade 1/2、重症のgrade 3/4に分けると、grade 3/4の患者は健常者、grade 1/2患者よりも強制呼吸下での横隔膜の動きが有意に小さいという結果になった。

換気強調画像

肺のピクセル値は、呼吸や心拍出によって変化する。胸部X線動態解析ではlow-pass filterとhigh-pass filterを用いることで、換気によるX線透過性の変化をピクセル値で描出し、換気強調画像を作成できる。換気強調画像は、吸気でピクセル値が低下したところを緑色、呼気でピクセル値が上昇したところをオレンジ色で表示する。健常者とCOPD患者の換気強調画像を比較すると、健常者では緑色とオレンジ色が均一に変化し、COPD患者は不均一に緑色とオレンジ色に変化する。図2の右肺がん切除術・放射線治療後の症例では、換気強調画像（図2a）右肺のbullaの箇所が正常部位と逆の動きをしている。肺換気シンチグラフィ（図2b, c）でも右肺では正常部分のみに核種の取り込みが見られ、換気強調画像と一致した。

血流強調画像

さらに、low-pass filterとhigh-pass filterを用いることで、心拍動による肺のピクセル値の変化を抽出でき、血流強調画像の作成が可能となる。図3は右肺動脈血栓塞栓症例で、換気強調画像（図3c）では吸気の緑色と呼気のオレンジ色が均一に分布しており、両肺が均一に空気を取り込んでいることが推察された。一方で、血流強調画像（図3d）では、左肺は心拍動と一致した変化が見られるが、右肺には認められなかった。X線動態解析画像（図3a）では、心拍動に合わせてピクセル値が変化しているのは左肺だけで、右肺には変化が見られなかった。このことから、換気強調画像、血流強調画像共にピクセル値の変化をある程度正確に抽出していると言える。

まとめ

胸部X線動態解析は、立位または座位で換気・心拍動を評価できるのがメリットである。われわれの検討では安静呼吸下、強制呼吸下において、左横隔膜の方が右横隔膜よりも大きく動いており、また安静呼吸下ではBMIが高いほど横隔膜の動きが大きいという結果が出ている。さらに、健常者とCOPD患者との比較では、強制呼吸下においては健常者の方が横隔膜の動きが大きく、安静呼吸下ではCOPD患者の方が大きくなった。このほか、換気強調画像では、健常者とCOPD患者における換気によるピクセル値の変化に違いが見られた。一方、血流強調画像は、造影剤を用いることなく粗大な肺動脈血栓塞栓症の評価が可能になると期待される。

●参考文献

- 1) Yamada, Y., Ueyama, M., Abe, T., et al. : Difference in diaphragmatic motion during tidal breathing in a standing position between COPD patients and normal subjects ; Time-resolved quantitative evaluation using dynamic chest radiography with flat panel detector system ("dynamic X-ray phrenicography") . Eur. J. Radiol., 87, 76 ~ 82, 2017.

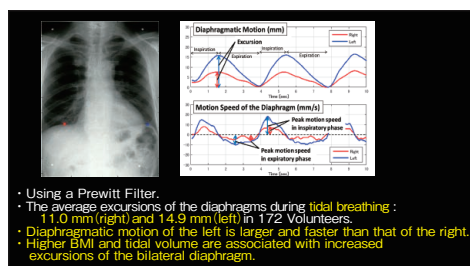


図1 胸部X線動態画像による横隔膜運動の評価

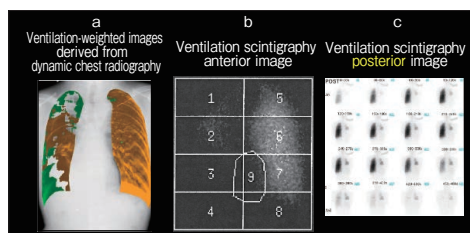


図2 右肺がん切除術・放射線治療後（68歳、男性）
a：換気強調画像 b, c：肺換気シンチグラフィ画像

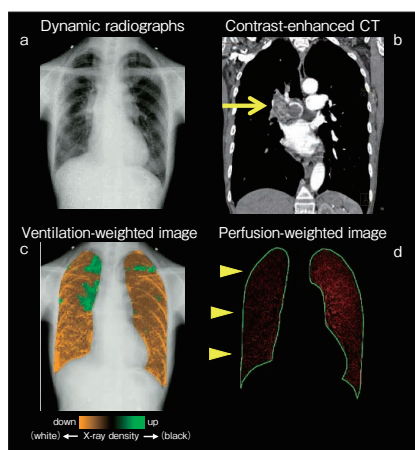


図3 右肺動脈血栓塞栓症例（75歳、女性）
a：X線動態解析画像 b：造影CT画像
c：換気強調画像 d：血流強調画像

当院における胸部動態撮影の進捗

坂巻 文雄

東海大学医学部附属八王子病院呼吸器内科



当院では、2018年からコニカミノルタ社製FPDシステムを用いた胸部動態撮影による呼吸器疾患診療に関する臨床研究を行っている。本講演では、実際の症例を提示しながら、当院における臨床研究の概要を紹介する。

呼吸器疾患診療の手段と課題

呼吸器疾患のうち、特に、慢性の進行性肺疾患〔慢性閉塞性肺疾患（COPD）、間質性肺炎など〕の重症例においては近年、問診による息切れ評価〔修正MRC（mMRC）、COPDアセスメントテスト（CAT）スコア〕や、急性増悪の回数（増悪リスク）がきわめて重視されている。また、単純X線写真、CT、病理検査などの画像診断や、換気機能検査・肺気量分画（残気量）、拡散能（DLco）などの機能検査、および病態を示す生化学的検査の指標値を用いて評価すると、同じCOPDや特発性肺線維症（IPF）でも予後が大きく異なることがわかる。

例えば、COPDでは、2011年に改定された新GOLD分類において、従来の病期分類（stage1～4）にmMRCやCATスコア、増悪リスクなどを加味してA～Dの4つに分類した上で、治療法を変えていくことが推奨されている。COPDの増悪は特定の患者に起こりやすい¹⁾ことが理由であるが、それをどのように抽出するかが課題となっている。

当院における臨床研究の実際

そこで、当院では初診時に胸部X線動態画像を撮影し動態解析を行うことで、重症度や増悪リスクの高い症例を抽出できるのではないかと考え、2018年1月から臨床研究を開始した。対象は正常コントロール約10～20例、COPD約20～30例、肺気腫合併肺線維症（CPFE）約5～10例、その他の疾患約20例である。臨床データとしては、症状記録（mMRC、CATスコア、増悪回数/年）、酸素飽和度（SpO₂）、肺機能（できるかぎりDLcoまで）、単純X線写真、CT（高精度CT

併用）などを収集する。

1. 当院のシステム構成と検査の流れ

当院では、コニカミノルタ社製のX線動態撮影システムを用いて撮影室にて約10秒間撮影を行い、静止画はPACSに保存し、動画は専用の動画解析ワークステーションに転送して動態解析を行う。このシステムの有用性として、被ばく量が単純X線写真数枚分と少ないことと、撮影が簡便であることが挙げられる。CTと同等の情報を、CTよりも簡単かつ低線量で得ることができる。

2. これまでの症例の概略

2018年9月までに胸部動態解析を行った症例の内訳は、COPDが最も多く19例、間質性肺炎8例、肺血栓塞栓症9例、肺がん1例、その他5例である。これらのうち、COPDは、スパイロメトリの1秒量対予測値%（%FEV1）から従来のGOLD分類で重症度を評価すると、stage2が最も多く、stage3が最も少なく、stage1、4はほぼ同数であった。一方、同じ症例を、増悪リスクを加味した新GOLD分類（A～D）で評価すると、同じ4段階でもBが最も多く、A、C、Dはほぼ同数となった。つまり、同じ%FEV1の症例の中にも、増悪リスクの高い症例が含まれていることがわかった。

3. 症例提示

図1は、41歳、女性。労作時息切れと浮腫、低酸素血症のため他院にて特発性肺動脈性肺高血圧症（PAH）と診断され、当院を受診した。肺機能検査では、肺活量58%と低下、機能的残気量（FRC）は107%と上昇しているが、

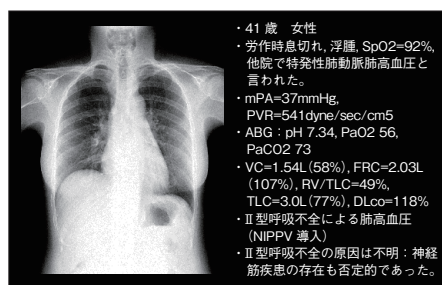


図1 右横隔膜神経麻痺による肺胞低換気症候群

全肺気量（TLC）は77%と少なく、一方、DLcoは118%と正常であり、肺実質に障害はないと考えられた。胸部動態撮影を行ったところ、静止画ではわからなかった右横隔膜神経麻痺による呼吸不全が判明し、肺胞低換気症候群と診断された。

このほか、重度のCOPD症例では、胸部動態撮影にて正常肺と比べて呼気時や吸気時に変化の乏しい部位が観察されており、今後、その定量化が望まれる。

さらに、当院では、呼吸機能の異なる症例の横隔膜の動きを定量的に比較する研究も行っている。COPDと健常例を比較すると、健常例では横隔膜の動きに障害は見られないが（図2b）、COPDでは2度目の吸気時に横隔膜の動きが不整となる（図2a）。

胸部動態撮影への期待

胸部動態撮像を行うことで、COPDや換気不全では、胸郭の動きや中枢気道の虚脱、換気の不均等などの観察、重症度・増悪リスク評価が可能になると期待している。間質性肺疾患の重症度・増悪リスク評価や、肺循環障害の救急外来での早期診断などにも有用と考えている。また、本方法は通常の胸部単純X線写真の弱点であった腫瘍と骨の重なりを除去できることも期待できるので、今後、腫瘍性病変のスクリーニングとしての有効性が期待される。

●参考文献

- 1) Hurst, J.R., et al., *N. Engl. J. Med.*, **363**, 12, 1128～1138, 2010.

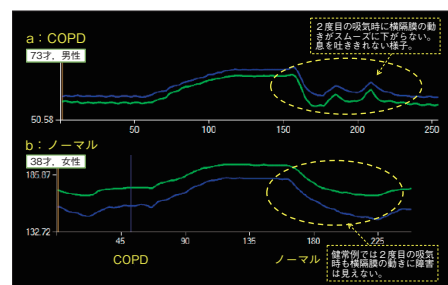


図2 横隔膜の動きの定量的比較

胸部X線動態画像を用いた呼吸機能評価方法の検討

大倉 徳幸 金沢大学附属病院呼吸器内科



当院では、コニカミノルタ社製胸部X線動画撮影システムを用いて、呼吸機能評価方法の検討を行った。本講演では、実際の検討方法および結果を報告する。

目的と方法

目的は、肺気量分画や最大努力呼出曲線、COPDアセスメントテスト（CAT）スコアとの比較から、肺面積変化と呼吸機能の関係性を検証することである。これにより、患者負担の少ない呼吸機能検査の確立や、精密肺機能検査の代替法の構築、身体活動性の評価をめざす。

方法は、対象者121例（男性80名、女性41名、 68.5 ± 9.3 歳）における胸部X線動画と呼吸機能の検討で、呼吸変動による肺面積変化率（% Change）は（最大吸気位肺面積－最大呼気位肺面積）／最大吸気位肺面積で求めた。症例の内訳は、スパイロメトリ正常範囲の肺がん術前患者36名、慢性閉塞性肺疾患（COPD）疑い46名、COPD 7名、間質性肺炎24名、喘息3名、その他5名である。撮影システムは、パルス照射以外は従来の静止画撮影とほぼ同等で、深呼気から深吸気にわたり10～20秒かけ秒間15フレームの撮影を行う。被ばく量は、20秒撮影でも静止画の正面＋側面撮影と同等（0.23mSv）である。

評価および考察

対象者は比較的高齢であり、呼吸機能を見ると約半数に気流制限があるため、1秒率（ $FEV_1/FVC\%$ ）は70%と低値の傾向であった。また、最大吸気位における肺面積と呼吸機能の相関関係（図1）を見ると、肺活量（VC）、機能的残気量（FRC）、全肺気量（TLC）と正の相関を認めたが、努力呼気曲線から得られる1秒量（ FEV_1 ）、1秒率、最大呼気中間流量（MMF）とは相関が見られなかった。続いて、呼吸変動に伴う肺面積変化率と呼吸機能との相関関係（図2）を見ると、肺活量、1秒量と弱い正の相関関係、残気率（RV/TLC）と負の相関

関係を認めた。特に残気率との相関関係からは、過膨張が進むと肺の動きが悪化する可能性が示唆された。

さらに、今回の対象者には、閉塞性換気障害と拘束性換気障害が混在しているため、まず気流制限（閉塞性換気障害）のある例に絞って解析を行った。予測値1秒量の程度で層別化し肺面積変化率を分けたところ、肺面積変化率は気流制限の進行とともに低下し、閉塞性換気障害が進むほど肺の動きが悪かった。次に、拘束性換気障害（間質性肺炎）例について、肺活量ごとに層別化して検討したところ、やはり肺活量低下が進行するほど肺面積変化率が低下し、肺が縮むほど肺の動きが悪かった。これらから、肺面積変化の定量化は、COPDや間質性肺炎の病期の進行評価にも有用である可能性が示唆された。

実際に、胸部X線動態画像にて正常呼吸機能（睡眠時無呼吸症候群：SAS）と重症COPDを比較したところ、重症COPDでは肺が過膨張となり動きが悪い

ことが確認できた（図3）。

そこで、QOLについて、COPD症例で評価を行った。実臨床で汎用されているCATスコアは、咳、痰、呼吸困難、活動性、うつ傾向など、QOLに関する8つの質問を点数化する評価法で、点数が高いほど症状が強くなる。一方、肺面積変化率は症状が強いほど低下しており、CATスコアとの相関関係を示した（図4）。つまり、肺の動きは呼吸機能だけでなく、QOL評価とも相関していることが示された。

結果

肺面積は、肺気量分画と強い相関を認めた。また、呼吸変動に伴う肺面積変化率は、残気率と相関を認めたほか、気流制限・肺活量低下の進行とともに低下し、さらに、COPD患者においては、CATスコアとの相関を認めた。以上から、胸部X線動態画像は、患者負担の少ない呼吸機能検査、および身体活動性評価の代替としての活用が期待される。

肺面積（最大吸気位）と呼吸機能の相関関係
Lung area (n = 121)

| | r | p |
|-------------|-------|--------|
| VC | 0.72 | < 0.05 |
| FEV_1 | 0.53 | < 0.05 |
| FEV_1/FVC | -0.33 | < 0.05 |
| MMF | 0.004 | 0.96 |
| FRC | 0.86 | < 0.05 |
| RV | 0.69 | < 0.05 |
| RV/TLC | 0.001 | 0.99 |
| TLC | 0.82 | < 0.05 |

肺面積（最大吸気位）は、肺活量・機能的残気量・全肺気量と正の相関を認めた。

図1 最大吸気位における肺面積と呼吸機能の相関関係

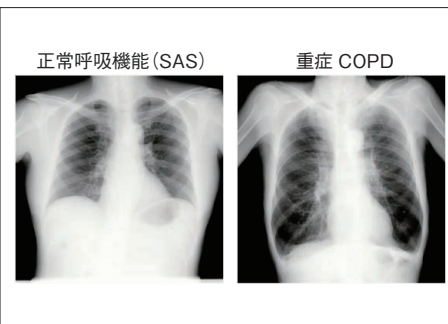


図3 正常呼吸機能（睡眠時無呼吸症候群）と重症COPDの画像比較

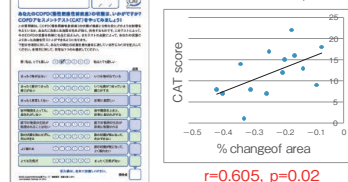
肺面積の変化率と呼吸機能の相関関係
%Change (n = 121)

| | r | p |
|-------------|-------|--------|
| VC | 0.21 | < 0.05 |
| FEV_1 | 0.31 | < 0.05 |
| FEV_1/FVC | 0.05 | 0.61 |
| MMF | 0.15 | 0.11 |
| FRC | -0.10 | 0.28 |
| RV | -0.18 | < 0.05 |
| RV/TLC | -0.40 | < 0.05 |
| TLC | 0.07 | 0.46 |

肺面積の変化率は、肺活量・1秒量と弱い正の相関関係を認めた。残気率と負の相関関係を認めた。

図2 呼吸変動に伴う肺面積変化率と呼吸機能との相関関係

肺面積変化率とCATスコアの相関関係
(n = 14)



肺面積の変化率は、COPD患者においてCATスコアと相関関係を示した。

図4 COPDにおける肺面積変化率とCATスコアの相関関係

胸部X線動態解析の肺切除術での活用

田村 昌也

金沢大学附属病院呼吸器外科



当院呼吸器外科では、主に肺がんに対して肺切除術を施行している。その周期において、胸部X線動態解析が役立つと考え、①肺切除症例に対する非侵襲的な呼吸機能評価方法の検討、②肺切除術における胸部X線動態撮影の活用方法の検討を行ったので、その結果を報告する。

肺切除症例に対する呼吸機能評価の検討

2016年2月～2017年12月に、肺がんのため肺葉切除術を施行した58例を対象に、胸部X線動態解析による肺面積変化率の検討を行った。背景肺は、正常肺21例、気腫合併線維症10例、肺線維症7例、肺気腫20例。切除葉は、上葉が33例、下葉が25例である。術後合併症は11例で見られ、肺炎5例、間質性肺炎急性増悪1例、気漏遷延5例であった。

撮影は、術前、術後1週間、術後1か月の時点で行った。検証方法は、術前背景肺、切除葉、術後合併症の有無について、グループごとに患側肺の肺面積変化率を比較した。なお、肺面積変化率は、式[(最大吸気位肺面積－最大呼気位肺面積)/最大呼気位肺面積]にて算出する。

1. 術前背景肺の比較

術前背景肺の肺面積変化率を正常肺、気腫合併線維症、肺線維症、肺気腫で比較した結果、有意差はないものの、肺線維症を併発した患者は正常肺に比べて術前の肺面積変化率が低い傾向が見られた($P = 0.07$)。

2. 切除葉の比較

上葉切除群と下葉切除群の肺面積変化率の比較では、術前は特に傾向は見られなかったが、術後1週間では上葉切除群は下葉切除群に比べて肺面積変化率が低い傾向にあった($P = 0.07$)。上葉切除症例と下葉切除症例のX線動態画像を比較すると、下葉切除症例では血管陰影、横隔膜の動きが全体的に大きく、肺面積変化率が高いことがわかるが、上葉切除症例では患側部の動きが小さい傾向が見られた。1か月後の撮影では、両群の肺面積変化率に差はほとんど見られなかった。

3. 術後合併症有無の比較

術後合併症が認められた群〔合併症(+)〕と認められなかった群〔合併症(-)〕について術前の肺面積変化率を比較したところ、合併症(+)は合併症(-)に比べてやや低い傾向があった($P = 0.09$)。さらに、術後1週間では合併症(+)の方が有意に低くなった($P = 0.04$)。気漏遷延症例ではドレーンが挿入されていることが影響している可能性も否定できないが、術後合併症有無の比較では、合併症(+)で肺面積変化率が低くなる傾向が見られると言えるだろう。

4. 小 括

背景肺の比較では、肺線維症を合併した患者は、術前の肺面積変化率が低下する傾向があった。また、切除葉の比較では、上葉切除を受けた患者は、術後1週間の肺面積変化率が低下する傾向が見られた。そして、術後合併症のある患者はない患者に比べて、術前の肺面積変

化率が低下する傾向があり、術後1週間の肺面積変化率は有意に低かった。

これらのことから胸部X線動態解析は、肺切除前後の肺機能を評価できる可能性、また、術後合併症予測に寄与する可能性があると考えられる。

肺切除症例における胸部X線動態撮影の活用方法の検討

肺切除術における胸部X線動態撮影の活用の可能性について、実際の症例画像を基に説明する。

動態画像では血管陰影から肺の動きを視認することができ、術後の経過観察に活用できると考えられる。図1は、右肺の切除術を施行した症例の術前、術後1週間、術後1か月の(動態)画像である。術後1週間では、まだ抜釘されておらず肺の動きが不良であるが、1か月後には肺の動きが改善していることがわかる。

胸部X線動態解析では定量的な解析も可能で、肺尖と横隔膜間の距離を計測することで、左右の肺や横隔膜の動きを個別に評価することができる。横隔膜神経麻痺の症例では、定量的評価により左に比べて右の横隔膜の動きが少なく、また左右の同調性が失われていることが明確にわかる(図2)。このような左右差は、静止画では把握が難しい情報であり、胸部X線動態撮影が活用できる領域である。

さらに、胸部X線動態撮影は癒着や浸潤の確認にも活用できる。血管陰影や胸壁の動きを視認できる動態画像では、動きが制限される癒着箇所、浸潤箇所を容易に推定することができ、肺切除術の術前・術後の評価に有用である。

まとめ

胸部X線動態撮影は、術後の経過観察や横隔膜神経麻痺の検出、癒着の検出、胸壁浸潤や大動脈浸潤の検出などにおいて非常に有用であり、肺切除術の周期において活用できる可能性がある。

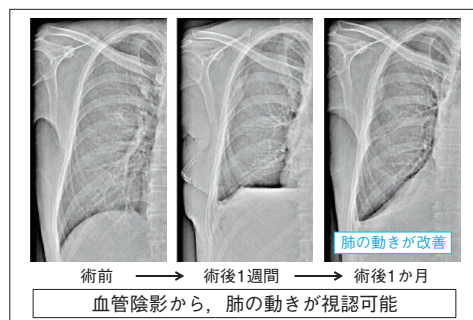


図1 肺切除術後の経過観察

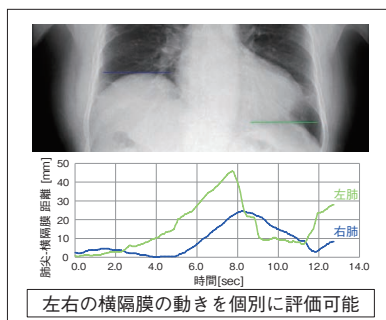


図2 横隔膜神経麻痺の確認

胸部X線動態解析による手術適応評価

花岡

淳

滋賀医科大学医学部附属病院呼吸器外科



当院呼吸器外科では、年間約230件の手術を施行しており、このうち120件前後が原発性肺癌に対する肺切除術である。肺切除術の周術期には、スパイロメトリーによる呼吸機能評価が行われてきたが、術後早期の検査では創痛などのため十分に測定できないことがあった。また、当院では以前、CTのボリュームメトリーでも評価を行っていたが、最大呼気の呼吸停止下での撮影となるため、動態で評価することはできなかった。

動態評価を可能とする胸部X線動態撮影では、努力呼吸時や安静呼吸時で肺がどのように変化しているかを評価できると考え、当院倫理委員会の承認を経て、2018年6月より臨床での撮影を開始した。本講演では、当院における胸部X線動態解析研究について紹介する。

肺切除術における呼吸機能評価

胸部X線動態解析では、換気と血流の情報を可視化・定量化できるが、当院では血流に注目し、呼吸器外科での活用方法を検討することにした。

X線動態解析の妥当性については、複十字病院から血流・換気を表す解析信号値と肺血流シンチグラフィ(^{99m}Tc)に相関が認められたとの報告があり($R = 0.72$)¹⁾、動態血流評価で肺血流シンチグラフィを代用できる可能性が示されている。

侵襲性の高い肺切除術では、術前のリスク評価が重要である。特に、心肺機能が重視されており、「肺癌診療ガイドライン」では、手術適応の決定においてはスパイロメトリーによる呼吸機能評価を行うことが推奨されている。呼吸機能評価では、スパイロメトリーでの肺活量(VC)や1秒率(%FEV1.0)の測定、精密肺機能検査での肺拡散能(DL_{CO})の測定、計算による術後呼吸機能予測などでリスク評価が行われる。術後呼吸機能予測において、術後%FEV1.0が40%未満の場合は非常に高リスクとなるため、縮小手術が検討される。

術後呼吸機能予測とは、切除後の残存肺の大きさと術前の呼吸機能を基に、計算式を用いて術後の呼吸機能を求めるものである。肺は、右肺が上葉・中葉・下葉の3葉、左肺が上葉・下葉の2葉あり、血流と気道から解剖学的に全19区域に分けられる。例えば、右上葉に腫瘍があり右上葉(3区域)切除を施行する場合、切除後の肺容量が16%減となるため、肺機能(%FEV1.0)は術前の100%から84%へと低下すると考える。これを術前の呼吸機能の結果に乗ずることで、術後の予測値を算出する。

この方法は非常に簡便ではあるが、慢性閉塞性肺疾患(COPD)や間質性肺炎を有している場合には、すでに肺機能が低下しているため、単純に区域数から計算する本方法は予測精度が低い。そこで当院では、より詳細に評価を行うために肺血流シンチグラフィを施行し、患側の寄与率も加味して術後呼吸機能予測値を算出し、手術適応を決定している。しかし、肺血流シンチグラフィ検査は手間とコストがかかる上、当院では検査日が限られており緊急性に欠けることが課題となっている。

胸部X線動態解析による術後呼吸機能予測

そこでわれわれは、術後呼吸機能予測に着目し、胸部X線動態解析の活用の可能性を検討することにした(図1)。動態解析では肺葉や区域などの細かい評価はできないが、左右肺に分けての評価は可能と考えられる。動態解析は、左肺・右肺それぞれの血流・換気の状態を考慮するため、予測精度が高いと期待されることに加え、動態撮影は手間やコストが少ない、迅速に検査が可能といったメリットがある。

われわれは今後、2つの検証を進めようと考えている。まず1つ目は、術後呼吸機能予測値と実測値の比較である。従来手法と動態解

析のそれぞれの計算式から算出した術後呼吸機能予測値と、術後に測定した呼吸機能実測値を比較することで、どちらの手法が適切かを検証する。2つ目が、合併症の有無による比較である。術後に合併症が起きたグループと起きなかったグループを比較し、術後呼吸機能予測値に有意差があるかを検証する。併せて、動画・解析結果から、合併症に関連する因子を検証していく予定である。

なお、撮影時期は術前、術後1か月、3か月、6か月、12か月のタイミングで実施する。肺機能は、術後3～6か月をかけて予測値まで回復すると言われており、その経過を追うことも含めて検討していく。

展望

胸部X線動態解析の今後の展望としては、まず、肺機能の局所異常評価ができないかと考えている。肺切除の際、残存肺に肺気腫などがあると呼吸機能が低下しやすく、合併症を生じやすいとの報告があることから、手術リスクを正確に推定するために、動態解析にて有効な所見が得られることに期待している。

もう1つが換気血流比(V/Q)ミスマッチの評価で、手間・コスト・被ばく量が少ない胸部X線動態解析で評価できるようになることを期待しており、手法の検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Aoki, M., et al : Dynamic Chest X-Ray Examination For Pulmonary Blood Flow Function: In Comparison With Tc-99m MAA Scintigraphy. American Thoracic Society 2012.

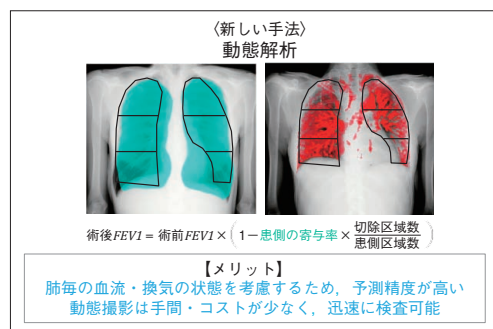


図1 動態解析による術後呼吸機能予測

動画X線画像が持つ臨床価値とその将来性 ～各専門領域から～

座長

黒崎 敦子 氏
長谷部光泉 氏

 公益財団法人結核予防会 複十字病院放射線診療部放射線診断科
 東海大学医学部付属八王子病院画像診断科

コメンテーター

柴田 陽光 氏
谷 徹 氏
髭谷 満 氏
織田 弘美 氏

 福島県立医科大学呼吸器内科学講座
 滋賀医科大学革新的医療機器・システム研究開発講座
 公益財団法人結核予防会 複十字病院呼吸ケアリハビリセンターリハビリテーション科
 埼玉医科大学病院病院長


第4部のディスカッションでは、「動画X線画像が持つ臨床価値とその将来性～各専門領域から～」と題して、各専門領域におけるX線動態画像の臨床応用について、4名のコメンテーターが臨床価値と可能性を述べた後、活発なディスカッションが行われた。

呼吸器内科

肺換気シンチグラフィを リプレースする可能性

柴田氏：呼吸器内科領域では、低酸素血症の原因となる換気/血流比の不均衡（V/Qミスマッチ）の評価が重要である。従来、その評価法として肺換気シンチグラフィがあったものの、煩雑な検査手技、被ばく、高コストなどの理由から普及が進んでいなかった。しかし、新たにX線動態画像が登場したことで、V/Qミスマッチの評価が容易に行える可能性がある。これは多くの呼吸器内科医が切望していたことであり、今後の適応に大きな期待を寄せている。

例えば、慢性呼吸器疾患では、気道感染などによって増悪するケースがあるが、安定期と増悪時の換気の違いをまだ明らかにできていない。X線動態画像を用いることで、V/Qミスマッチが慢性呼吸器疾患の病態にどのような影響を与えているかを評価できるようになってきていると考えられる。そのためにも、今後は定量性の高い評価方法を検討していくことが重要である。

外科領域

術後合併症の早期診断が可能に

谷氏：外科領域では、イベント発生前後の変化を観察できることが、大きな武器になると考えられる。それには、まずポータブル型のX線動画撮影システムの開発が期待される。ポータブル化できれば、例えば、手術後に病棟で経時的に撮影

したX線動態画像から循環系パラメータの変化を推計するといった用途が期待できる。

また、術後の合併症は背臥位の状態が発症することが多いため、術前・術後とも背臥位で撮影したX線動態画像から肺機能の情報が得られれば、合併症のリスク評価に有用だろう。

このほか、整形外科手術などを施行した患者はD-dimerが高値だと肺血栓塞栓症が疑われるが、このような症例においても、X線動態画像によって早期発見が可能になると期待される。

リハビリテーション、 救急・災害医療 呼吸法の指導での活用へ期待

髭谷氏：当院では、呼吸器疾患患者のリハビリテーションにおいて、効率の良い呼吸法である腹式呼吸の指導を行っている。臥位から始めて、座位、立位へと指導を行っていくが、立位での腹式呼吸ができない患者がいる。このような症例にX線動態画像を用いて、患者の呼吸の状態や有効な指導法を検証できると考えられる。

また、喘息や慢性閉塞性肺疾患（COPD）の患者に対して行っている呼吸時の気道閉塞防止のための口すばめ呼吸の有効性の検証に、X線動態画像が役立つ可能性がある。口すばめ呼吸によりエアートラッピングが解消されるのを動画で観察できると期待される。さらに、気管支拡張薬などの吸入薬に対する吸入の指導も行っているが、吸入が正しく行っていない患者が非常に多いため、気管支拡張薬の吸入によって気管の拡張や空気の流れを、X線動態画像で視覚的に確認できれば、吸入指導の効果確認に有用と思われる。

呼吸器以外では、嚥下のリハビリテーションへの適応が期待される。嚥下障害

の評価には嚥下造影検査（VF）が有用であるが、モダリティなど設備が整っておらず施行できない施設では、X線動態画像が代替検査として有用となる可能性がある。このほか、整形外科領域のリハビリテーションにおいて、関節の動きの評価への適応も考えられる。

一方、救急やICUなど超急性期医療においても、X線動態画像の有用性が期待される。われわれは下側肺障害を生じた患者に対して、体位ドレナージを施行しているが、肺のどの区域に無気肺が生じて血流の低下や換気の障害を起こしているか、といった情報を得ることが重要となる。現状、CTを施行しているが、X線動態画像を用いることで容易に評価することが可能になり、治療精度の向上も期待できる。

整形外科

人工膝関節置換術の術前評価に 適応可能

織田氏：整形外科領域でのX線動態画像の適応については、まず人工膝関節置換術の術前評価が挙げられる。人工膝関節には、後十字靭帯を温存するcruciate retention type（CR型）と切除するposterior stabilizer type（PS）型がある。CR型は最大屈曲角度に制限がなく、固有深部知覚を維持できるものの、付着部剥離を行う必要があり、手技が困難である。この付着部剥離の長さをX線動態画像により術前に評価することで、CR型の手術の適応を増やせるとともに、手技の精度を高めることが可能になる。

そのほかにも、腰部脊柱管狭窄症に対する適応も期待できる。現在、手術適応患者に対しては脊髄造影を施行しているが、X線動態画像で動態を観察することにより、手術の適応などの評価が可能になる。

X線動態画像セミナー

2019年3月21日発行

発行：コニカミノルタジャパン株式会社

〒105-0023 東京都港区芝浦1-1-1

Tel (03) 6324-1080 (代)

<http://www.konicaminolta.jp/healthcare>



KONICA MINOLTA

Giving Shape to Ideas

[二次元コードから動画画像をご覧頂けます]



オリジナル動画像



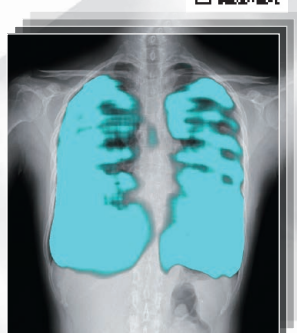
BS-MODE
(胸部骨減弱処理)



FE-MODE
(周波数強調処理)



DM-MODE
(特定成分追跡処理)



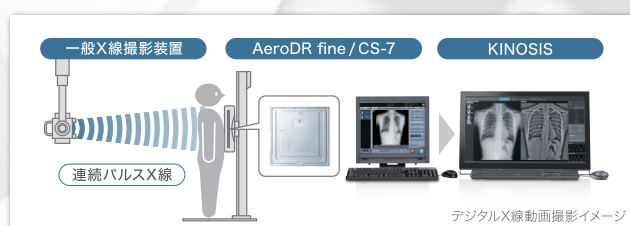
PL-MODE
(基準フレーム比計算処理)



PH-MODE
(相互相関計算処理)



単純X線撮影は、動画撮影の領域へ



デジタルX線動画撮影システムは、X線動画解析ワークステーション「KINOSIS(キノシス)」、
可搬型DR「AeroDR fine」、及び一般X線撮影装置*1で構成され、
パルスX線を連続照射し、コマ撮りした画像を連続表示することで、動画を作る、全く新しいシステムです。

X線動画解析ワークステーション

KINOSIS

*1 一般X線撮影装置としては、(株)島津製作所「診断用X線装置 RADspeed Pro」を採用しています。★「X線動画解析ワークステーション KINOSIS」、及び「KINOSIS」は、「画像診断ワークステーション コニカミノルタ DI-X1」(製造販売認証番号:230ABBZX00092000)の呼称です。★「AeroDR fine」は、「デジタルラジオグラフィ SKR 3000」(製造販売認証番号:228ABBZX00115000)の呼称です。★記載の会社名・商品名は、各社の商標または登録商標です。

製造販売元：コニカミノルタ株式会社 販売元：コニカミノルタジャパン株式会社 105-0023 東京都港区芝浦1-1-1 TEL (03) 6324-1080 (代) <http://www.konicaminolta.jp/healthcare>