総説

呼吸器診断のパラダイムシフト： 胸部 X 線動態撮影の現状と将来展望

田中利恵¹ 笠原寿郎² 大倉徳幸² 松本 勲³ 田村昌也³ 高田宗尚³
井上 大⁴ 出雲崎晃⁴ 堀井純清⁵ 松浦幸広⁵ 真田 茂⁶

¹ 金沢大学医薬保健研究域

² 金沢大学附属病院呼吸器内科

³ 金沢大学呼吸器外科

⁴ 金沢大学附属病院放射線科

⁵ 金沢大学附属病院放射線部

⁶ 公立小松大学保健医療学部

論文受付
2021 年 5 月 21 日

論文受理
2021 年 6 月 29 日

Code Nos. 253
532

Paradigm Shift in Respiratory Diagnosis: Current Status and Future Prospects of Dynamic Chest Radiography

Rie Tanaka,^{1*} Kazuo Kasahara,² Noriyuki Ohkura,² Isao Matsumoto,³ Masaya Tamura,³ Munehisa Takata,³ Dai Inoue,⁴ Akira Izumozaki,⁴ Junsei Horii,⁵ Yukihiro Matsuura,⁵ and Shigeru Sanada⁶

¹ College of Medical, Pharmaceutical & Health Sciences, Kanazawa University

² Department of Respiratory Medicine, Kanazawa University Hospital

³ Department of Thoracic Surgery, Kanazawa University

⁴ Department of Radiology, Kanazawa University Hospital

⁵ Division of Radiology, Kanazawa University Hospital

⁶ Faculty of Health Sciences, Komatsu University

Received May 21, 2021; Revision accepted June 29, 2021

Code Nos. 253, 532

Summary

Dynamic chest radiography (DCR) is a flat-panel detector (FPD) -based functional X-ray imaging, which is performed as an additional examination in chest radiography. The large field of view of FPDs permits real-time observation of motion/kinetic findings on the entire lungs, right and left diaphragm, ribs, and chest wall; heart wall motions; respiratory changes in lung density; and diameter of the intrathoracic trachea. Since the dynamic FPDs had been developed in the early 2000s, we focused on the potential of dynamic FPDs for functional X-ray imaging and have launched a research project for the development of an imaging protocol and digital image-processing techniques for the DCR. The quantitative analysis of motion/kinetic findings is helpful for a better understanding of pulmonary function, because the interpretation of dynamic chest radiographs is challenging and time-consuming for radiologists, pulmonologists, and surgeons. Recent clinical studies have demonstrated the usefulness of DCR combined with the digital image processing techniques for the evaluation of pulmonary function and circulation. Especially, there is a major concern in color-mapping images based on dynamic changes in radiographic lung density, where pulmonary impairments can be detected as color defects, even without the use of contrast media or radioactive medicine. Dynamic chest radiography is now commercially available for the use in general X-ray room and therefore can be deployed as a simple and rapid means of functional imaging in both routine and emergency medicine. This review article describes the current status and future prospects of DCR, which might bring a paradigm shift in respiratory diagnosis.

Key words: dynamic chest radiography, flat-panel detector, functional imaging, respiratory diagnosis, image analysis

*Corresponding author

緒言

フラットパネルディテクタ (flat-panel detector: FPD) を用いて、呼吸状態を連続撮影する胸部 X 線動態撮影 (dynamic chest radiography: DCR) は、その高い時間分解能と広い撮像視野、更に動画解析技術により、動的な画像所見に基づく肺機能診断を可能にする¹⁾。DCR の研究開発は 2003 年頃から始まり²⁾、放射線技術科学、画像診断学、呼吸器内科/外科学、医学物理学、臨床工学など、複数の学問領域の融合・多職種連携・産学官連携による臨床研究を経て、2018 年 11 月に実用化された。現在、初期導入施設から呼吸器診断における DCR の有用性が数多く報告されている。本稿では、呼吸器診断にパラダイムシフトをもたらす可能性のある DCR について、その現状と将来展望を解説する。

1. 研究開発の歴史

X 線技術を用いた肺機能評価は、1960 年頃から試みられてきた。1970 年代には、autofluoroscope ラインスキャンによる肺血流および肺換気評価や、fluorodensitometry や videodensitometry による局所肺換気および横隔膜動態評価が行われた^{3,4)}。1980 年代に入ると、大口径イメージンテンシファイア (I.I.)-X 線 TV システムによる手法が主流になった⁵⁾。これらは、リアルタイムに動き情報を得る手段として期待されたが、画質や撮像視野に制約があり実用化には至らなかった。その後、2002 年に動画対応 FPD が開発されると、「一般撮影室で実施可能な X 線機能イメージング」の創出を目標に、撮影プロトコルや動画解析技術の開発が行われた^{1,2,6-22)}。並行して、カセット型 FPD の実用化・動画対応化・軽量化などの技術革新が進み²³⁾、デジタル X 線動態撮影システムとして薬機承認され、2018 年 11 月に実用化に至った。現在、国内約 50 施設で稼働している (2021 年 11 月時点)。初期臨床研究では、DCR から得られるさまざまな動的な画像所見が、呼吸器診断の新規指標となることが明らかになった (詳細は「4. 動的な画像所見と動画解析技術」の項を参照)。先人の知見、最先端 FPD、動画解析技術のイノベーションにより実現された DCR は、X 線画像検査に新たな価値を創出する、今注目の技術といえる。

2. 撮影システム

DCR は、15 フレーム/秒程度のパルス X 線を連続照射できる X 線発生装置と、そのパルス X 線を受けて連続的に画像形成する FPD によって実施され

る^{1,21)}。胸部領域の場合、肺野や縦隔部のわずかな濃度変化を機能情報として用いるため、FPD の入出力特性には高い直線性が、パルス X 線には高い再現性がそれぞれ求められる。また、X 線動態撮影では、ビニング (複数画素を一つの信号として扱う技術) により、S/N 比の向上、電気ノイズ低減、高速読み出しを実現している。時間分解能と空間分解能はトレードオフの関係にあるため、例えば 2×2 画素を 1 信号として扱うビニングの場合、静止画で撮影する場合に比べ画素サイズは 2 倍 (マトリックスサイズは 1/2) になる。2021 年 11 月時点では、コニカミノルタ (東京) のカセット型デジタル X 線撮影装置 AeroDR fine とコンソールの CS-7、島津製作所 (京都) の RADspeed Pro の組合せで実施可能である。

3. 撮影方法

Figure 1 に努力呼吸を 10 秒間撮影するための撮影プロトコルの一例を示す²¹⁾。最大呼気位と最大吸気位でそれぞれ 2 秒間の息止めを指示する 14 秒の撮影プロトコルもある¹⁾。DCR では、呼吸状態を 15 フレーム/秒 (fps) の撮影レートで 10-14 秒程度撮影する。肺機能进行评估したい場合は最大努力呼吸で、努力呼吸が困難な患者は自然呼吸で、循環機能を中心に評価したい場合は息止めの状態で、といった具合に、被検者の状態や検査目的に応じた呼吸方法 (自然・最大努力・息止め)・体位 (立位・座位・臥位・側臥位)、方向 (正面・側面・斜位) にて撮影する。いずれの場合も、再現性を保つためにオートボイスシステムの利用と撮影前の練習が推奨される⁷⁾。特筆すべきは、高い X 線検出効率を誇る FPD により、従来の胸部単純 X 線撮影と同程度の線量で X 線動態検査が可能なことである。現在は、検出器表面の総入射線量が、胸部単純 X 線撮影 2 回分 (正面+側面) (1.9 mGy) 以内となる設定がデフォルト値となっている (100 kV, 0.2 mAs/pulse, 15 fps, 撮影距離 2.0 m, 10 秒間の撮影で約 1.4 mGy)^{24,25)}。しかし、撮影条件については最適化の余地がある。例えば、15 fps は頻脈状態も想定した循環機能評価に必要な撮影レートである¹⁾。ファントム実験の結果、60-84 拍/分 (bpm) で 7.5-10 fps の撮影レートが必要であると報告されている。したがって、評価対象が呼吸機能のみの場合は 3 fps 程度の撮影レートで十分である。また、10-14 秒間撮影するのは努力呼吸 1 サイクルを含めるためであり、評価対象が循環機能のみの場合は 5 秒程度の撮影時間で十分である。更に、体厚が薄い場合は線量を落とすなど、検査目的や被検者の体型に応じた条件設定にすることで、更なる低減が可能である。

Fig. 1 One example of imaging protocol for dynamic chest radiography (10 sec version of forced respiration) (citation from Ref. 21 with partial modification).
fps: frame per second

Fig. 2 Motion/kinetic findings revealed on dynamic chest radiographs.

4. 動的な画像所見と動画解析技術

呼吸状態を撮影した胸部 X 線動画像には、気管径や肺面積の変化、横隔膜・肋骨・心壁などの動き、肺気量や肺循環に伴う肺野や縦隔部の濃度変化(=Δピクセル値)などが描出されている (Fig. 2)。しかし、これらの動的な画像所見を肉眼で評価するのは困難である。そこで DCR による機能診断に必須となるのが、動画解析技術である。人の識別・処理能力を超えるわずかな変化であっても、動画解析により可視化・定量化することで診断情報として活用されるようになる。以下に、呼吸器や循環器の機能診断に有用な動的な画像所見、解析方法、初期臨床研究の成果を示す。

4-1 横隔膜運動

左右の横隔膜を同時に観察できる胸部 X 線動画像では、横隔膜運動の減少、遅延、左右逆相など、横隔膜のさまざまな運動異常が検出される。また、各フレームの呼吸位相判定にも有用である⁹⁾。Figure 3 に横隔膜運動の計測点と計測結果を示す。1 フレーム目では、四つの計測点 (左右の肺尖部の頂点および横隔膜ドームの一点) をエッジ検出により決定する。2 フレーム目以降は、テンプレートマッチング等の技術を用いて計測点を自動追跡する⁸⁾。肺尖部-横隔膜間距離の最大変化量が、横隔膜移動量になる。このように定量化・可視化することで、左右比較や経過観察が容易になり、効率化・診断能向上などの効果が期待される。

Fig. 3 The measurement points and results for quantifying the diaphragm movement (reused from Ref. 21 with partial modification).

慢性閉塞性肺疾患 (chronic obstructive pulmonary disease: COPD) を対象とした最近の臨床研究において、努力呼吸時の横隔膜の移動量と呼吸機能検査の結果の間に相関がみられ、かつ、COPD 重症症例では正常群に比べ、横隔膜の移動量とピーク速度が有意に低下することが明らかになっている^{26, 27)}。一方、安静呼吸時には両者に相関はなく、COPD 症例では正常群に比べ、横隔膜の移動量とピーク速度が有意に上昇することが明らかになっている^{28, 29)}。安静呼吸時の COPD 症例にみられるこの現象は、低下したガス交換機能への補償反応の現れと考えられる。このように肺機能を反映する横隔膜の動的な画像所見は、COPD の重症度評価の新規指標として期待されている。

4-2 肺面積変化

前述の横隔膜運動に関連するが、肺面積変化やその変化率も肺機能の重要な指標である。例えば、最大吸気時と最大呼気時の肺面積の差として算出される変化量や、変化量を最大吸気時の肺面積で除して得られる変化率が、呼吸機能検査の結果 (残気率 (RV/TLC)、予測 1 秒量に対する % (%FEV1) や COPD の評価指標である COPD アセスメントスコア (CAT score) と相関があることが報告されている^{30, 31)}。RV/TLC は air trapping の指標であり、一方、%FEV1 は気流制限の指標であることから、それらと相関のある肺面積の変化量・変化率は、COPD の重症度評価に有用な指標となる可能性がある。胸部 X 線動画像を対象とした肺面積計測は、U-Net などの深層学習を用いた肺セグメンテーションにより、迅速かつ高い再現性で計測される²⁰⁾。

4-3 肋骨動態

肋骨動態もまた、肺機能を理解するための重要な評価項目である。正常な肋骨動態は、左右対称で横隔膜運動と同調することが知られており、その正常パターンからの逸脱を根拠に異常な肋骨動態の検出が可能である。肋骨動態については、肋骨の移動ベクトルや移動量の可視化や、左右対称性の定量評価などが試みられている^{6, 19)}。また、通常の CT 画像と胸部 X 線動画像との二次元/三次元レジストレーションにより、肋骨運動を四次元で再現する技術も開発されている³²⁾。肋骨の動態異常は、肺機能の低下につながることから、DCR による肋骨動態の解析により、間接的な肺機能評価が可能になる。

4-4 肺野濃度の変化

胸部 X 線動画像の肺野で観測される濃度変化は、単位容積あたりの肺血管・気管支の密度変化や血液ボリューム変化に起因する。肺野濃度の変化はピクセル値の変化として計測され、呼吸生理・循環生理に矛盾しない変化を示すことが報告されている^{1, 12)}。また、肺シンチグラフィで計測される RI カウント数と肺野濃度変化量 (=Δ肺野濃度) に高い相関があることも確認されている (肺換気: $r=0.81$, 肺血流: $r=0.87$)³³⁾。Figure 4 に、フレーム間差分処理とカラーマッピング技術で作成される機能画像を示す²¹⁾。基準画像からの差分値の大きさ (例: 呼吸性を青, 血流性を赤)^{33~38)} や、フレーム間差分値の正負 (例: 増加を暖色, 減少を寒色)^{10, 11, 39)} に応じた色合い/強度で表現される。基準画像だが、呼吸性の Δ肺野濃度を可視化する際は、肺内含気量が最小である最大努力呼吸フレームとし、血流

性の Δ 肺野濃度を可視化する際は、肺内血液が最小である拡張期末期、もしくは1心拍分のフレームから作成される最大値投影像(検出器入射線量とピクセル値が反比例の場合は最小値投影像)とするなど、用途・目的に合わせて設定する¹⁷⁾。また、1呼吸サイクルもしくは1心拍の平均画像を基準画像に採用することで、平均的な状態からの増減が表現される。いずれにしても、肺野や縦隔部のわずかな濃度変化の評価が可能になることから、造影剤や放射性医薬品を使用しない新しい機能画像として期待されている。

これまでの動物実験ならびに初期臨床研究で、呼吸性の Δ 肺野濃度については、①呼吸性の Δ 肺野濃度と1回吸気量の間に高い相関があること、②呼吸性の Δ 肺野濃度の大小を可視化した肺機能画像上で、肺換気障害を Δ 肺野濃度の減少領域として検出できること、③気流制限とair trappingの鑑別や、過膨張の検出も可能であること、④換気の局所評価差異をとらえる計測能を有すること、⑤呼吸性の Δ 肺野濃度計測について高い再現性を有することなどが明らかになっている^{35, 36, 38, 39)}。一方、血流性の Δ 肺野濃度については、①血流性の Δ 肺野濃度は呼吸性の Δ 肺野濃度の約1/10程度であること、②血流性の Δ 肺野濃度と循環パラメータ(心拍出量、血圧、中心静脈圧、肺動脈圧)と間に相関があること、③血流性の Δ 肺野濃度の大小を可視化した肺機能画像上で、肺血流障害を Δ 肺野濃度の減少領域として検出できることなどが明らかになっている^{33, 34, 37, 40~44)}。これらの研究成果から、DCRで得られる Δ 肺野濃度は、肺機能ならびに循環機能の新規指標として、また、カラーマップ画像は新規機能画像として期待されている。その診断能については、臨床研究と並行して仮想臨床試験によっても検証されている。Computational phantomを用いた仮想臨床試験では、 Δ 肺野濃度は残存する正常肺組織の厚さの関数で表現されること、更に、正常肺組織の厚さが80 mm以下の肺領域が、胸部X線動画像上で Δ 肺野濃度の減少として検出されることなどが報告されている⁴⁵⁾。

臨床応用に際しては、肺野や縦隔部の濃度変化から評価できることは、肺胞レベルで行われているガス交換や肺血流そのものではなく、それらに関連する相対的なパラメータであることに留意しなければならない。したがって、同一患者における左右比較や経過観察、ならびに正常範囲からの逸脱を根拠とした異常検出など、間接的・相対的な機能診断としての用途が適切と考えられる。

4-5 V/Q study

呼吸性と血流性の肺濃度変化の比率に基づく ventilation/perfusion (V/Q) study の実現可能性も検討されている。 Δ 肺野濃度のV/Qは、呼吸性の Δ 肺野濃度と血流性の Δ 肺野濃度の比として算出される。初期検討では、 Δ 肺野濃度のV/Qの肺換気・血流ミスマッチに対する感度は63.3%、特異度は60.1%と、臨床使用するには十分な性能とはいえない。DCR独自の正常範囲の確立が必要と考えられる。算出アルゴリズムの改良による診断能向上を期待したい^{38, 46)}。

4-6 気管径変化

呼気時の中枢気道虚脱は、呼気時に気道が50%以上狭窄する病態として定義され、胸腔内圧の上昇によって発生し、喫煙者では呼吸器 quality of life (QOL) 低下や息切れの強さ関連するとされている。DCR上で計測される気管径変化については、正常症例に比べCOPDのほうが大きいことと、変化率30%以上の症例で肺機能が有意に低下することが報告されている⁴⁷⁾。このことから、DCRにおける気管径の変化はCOPD評価の有用な指標となると考えられる。

4-7 肺がんの動き

ビデオ胸腔鏡下手術は、開胸手術よりも小さな切開範囲で好成績が得られる術式として広く普及している。しかし、肺がんは胸壁浸潤や胸膜癒着がある場合は、手術時間の延長や開胸手術への切り替えへの備えが必要となるため、その有無を術前に把握することは極めて重要である。その手段として、吸気/呼気CT、四次元CT、シネMRI、超音波検査などがあるが、DCRもその選択肢の一つとして期待されている。例えば、肺がんは胸壁浸潤がある場合は、肺がん浸潤臓器/構造の呼吸性動態が類似すること、また、胸膜癒着は肺野内局所の動きの制限として検出されることなどが報告されている(Fig. 5)^{48~50)}。広い撮像視野・高い時間分解能・低被ばくで肺がん周囲組織の動きを把握できるDCRは、肺癌の胸壁浸潤/胸膜癒着判定ツールとしても期待されている。

5. 将来展望

動的な画像所見からさまざまな生理現象をリアルタイムに理解できることから、術中支援や救急医療での活用も考えられる。また、COPDや慢性血栓塞栓性肺高血圧症(CTEPH)を対象に、さまざまな動的な画像所見を包括利用する診療フローチャートの開発も進められている。胸部X線検査は国民社会にとって最も

Fig. 4 Visualization of changes in radiographic lung density (Δ pixel value).

(a) Visualization algorithm for respiratory changes and the resulting images in the porcine model of atelectasis with (b) limited airflow and (c) air trapping in the right lower lung. (d) Visualization algorithm for blood-flow changes and the resulting images in the porcine model of pulmonary embolism^{17, 21, 36, 37}.

The color-mapping technique allows for the real-time assessment of local pulmonary function and a differential diagnosis between limited air flow and air trapping, along with the detection of pulmonary embolism. (reused from Fig. 4a in Ref. 21 with partial modification)

Fig. 5 Prediction of pleural adhesions of lung tumor based on dynamic chest radiography⁵⁰⁾. (Upper) CT and projection images, (Lower) two-dimensional loci of the tumor in the right lower lung (a) involving the chest wall (b), partially attached with the chest wall, and (c) away from the chest. The circle, triangle, and square points on projection images represent the center of tumor, rib (reference), and diaphragm, respectively. SI: superoinferior, RL: right-left

身近な医用画像検査であることから，社会的・学術的インパクトは大きく，DCRは呼吸器診断にパラダイムシフトをもたらす可能性がある．本稿では胸部領域を中心に述べたが，頸椎・腰椎・手関節・膝関節などの全身の関節から嚥下運動まで，あらゆる部位で応用可能である^{51～53)}．静から動へ，形態から機能へ．X線

撮影に新たな画像診断体系が創出されようとしている．今後の臨床展開に期待したい．

謝 辞

臨床研究にご協力いただいた，呼吸器内科/呼吸器外科/放射線科/放射線部の関係各位，動物実験にご協

力いただいた滋賀医科大学バイオメディカルイノベーションセンターの谷徹先生、同放射線科の新田哲久先生、同救急・集中治療部の田畑貴久先生ならびに関係各位、画像解析にご助言・技術提供いただいた名古屋大学の森健策先生、小田昌宏先生、Holger 氏、小田紘久氏、デューク大学の Dr. Samei, Dr. Segars, Dr. Abadi, 画像データ取得にご協力いただいたコニカミノルタ株式会社開発統括本部の米山努氏、村岡慎太郎氏、松谷啓嗣氏、関係各位に心から感謝申し上げます。

本研究は JSPS 科研費 (19K12841, 21H02866), MEXT 科研費 (15H01113, 16K10271, 17H05286), ふくしま医療福祉機器開発事業費補助金, 公益財団法人立石科学技術振興財団, 公益財団法人医科学応用研究財団, 循環器学研究新興研究基金, 公益財団法人中谷

医工計測技術振興財団, 公益財団法人三菱財団, 公益財団法人三谷研究開発支援財団, 公益財団法人島津科学技術振興財団の助成を受けたものである。

利益相反

画像データは, 金沢大学がコニカミノルタ株式会社から提供を受けたデジタル X 線撮影装置 (試作機) を用いて取得した。本稿で紹介した研究成果の一部は, コニカミノルタ株式会社の委託研究助成を受けて得られたものである。その委託研究の研究代表者は笠原であり, 分担者に田中, 大倉, 松本, 井上, 松浦が含まれる。

上記以外に, 筆頭著者および共著者全員に申告すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) Tanaka R. Dynamic chest radiography: flat-panel detector (FPD) based functional X-ray imaging. *Radiol Phys Technol* 2016; 9(2): 139-153.
- 2) 田中利恵, 真田茂, 鈴木正行, 他. 胸部動画像を対象とした呼吸性動態の定量化. *医用画像情報会誌* 2003; 20(1): 13-19.
- 3) Toffolo RR, Beerel FR. The autofluoroscope and 133-Xe in dynamic studies of pulmonary perfusion and ventilation. *Radiology* 1970; 94(3): 692-696.
- 4) George RB, Weill H. Fluorodensimetry. A method for analyzing regional ventilation and diaphragm function. *JAMA* 1971; 217(2): 171-176.
- 5) Silverman NR. Clinical video-densitometry. Pulmonary ventilation analysis. *Radiology* 1972; 103(2): 263-265.
- 6) 田中利恵, 真田茂, 鈴木正行, 他. 新しいスクリーニング胸部 X 線撮影法による肺紋理の移動解析および肺野内局所の濃度解析. *日放技学誌* 2002; 58(11): 1489-1496.
- 7) 田中利恵, 真田茂, 小林健, 他. 胸部動態画像診断のための X 線撮像法の開発: 撮影時の合図の出し方についての検討. *日放技学誌* 2003; 59(8): 984-992.
- 8) Tanaka R, Sanada S, Suzuki M, et al. Breathing chest radiography using a dynamic flat-panel detector combined with computer analysis. *Med Phys* 2004; 31(8): 2254-2262.
- 9) Tanaka R, Sanada S, Kobayashi T, et al. Computerized methods for determining respiratory phase on dynamic chest radiographs obtained by a dynamic flat-panel detector (FPD) system. *J Digit Imaging* 2006; 19(1): 41-51.
- 10) Tanaka R, Sanada S, Okazaki N, et al. Evaluation of pulmonary function using breathing chest radiography with a dynamic flat panel detector: primary results in pulmonary diseases. *Invest Radiol* 2006; 41(10): 735-745.
- 11) Tanaka R, Sanada S, Tsujioka T, et al. Development of a cardiac evaluation method using a dynamic flat-panel detector (FPD) system: a feasibility study using a cardiac motion phantom. *Radiol Phys Technol* 2008; 1(1): 27-32.
- 12) Tanaka R, Sanada S, Okazaki N, et al. Detectability of regional lung ventilation with flat-panel detector-based dynamic radiography. *J Digit Imaging* 2008; 21(1): 109-120.
- 13) 田中利恵, 真田茂. 動画対応 FPD による新しい画像検査法の展望. *日放技学誌* 2009; 65(6): 861-868.
- 14) 田中利恵, 真田茂, 藤村政樹, 他. 動画対応フラットパネルディテクタによる肺機能画像診断法: 肺シンチグラフィ所見との比較. *日放技学誌* 2009; 65(6): 728-737.
- 15) 田中利恵, 真田茂, 藤村政樹, 他. 胸部 X 線動画像におけるピクセル値変化量計測の有用性: 放射性同位元素 (RI) 計数値との比較. *医用画像情報会誌* 2009; 26(1): 13-16.
- 16) 川嶋広貴, 田中利恵, 真田茂. 胸部 X 線動態撮影の再現性の検証—ピクセル値の呼吸性変化—. *日放技学誌* 2009; 65(6): 738-744.
- 17) 真田茂, 田中利恵. 連続 X 線画像スクリーニング検査装置, プログラム及び記録媒体. 日本国特許 特許第 5093727 号. 取得日 2012 年 9 月 28 日.
- 18) 田中利恵, 真田茂. 低コスト・低被ばくポータブル X 線肺機能イメージング (診る聴診器) の開発. *医用画像情報会誌* 2014; 31(2): 13-17.
- 19) Tanaka R, Sanada S, Sakuta K, et al: Quantitative analysis of rib kinematics based on dynamic chest bone images: preliminary results. *J Med Imaging* 2015; 2(2): 024002.
- 20) Kitahara Y, Tanaka R, Roth H, et al. Lung segmentation based on a deep learning approach for dynamic chest radiography. *Proc SPIE* 2019; 10950: 109503M.
- 21) 田中利恵. 2. 静止画システムの最新技術動向, 1) 動態解析技術の現状と将来展望, I. 静止画編: 静止画システムの最新技術動向と臨床応用. *Innervision* 2020; 35(1): 6-10.
- 22) Hata A, Yamada Y, Tanaka R, et al. Dynamic chest X-ray using a flat-panel detector system: technique and applications. *Korean J Radiol* 2021; 22(4): 634-651.
- 23) 田中利恵. 1. 静止画システムの進化とイノベーション, I. 静止画編: 静止画システムの最新技術動向と臨床応用. *Innervision* 2020; 35(1): 3-5.
- 24) International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA Safety Series No. 115. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA); 1996; 279.
- 25) Annex IV. Schedule III. Guidance levels of dose, dose rate and activity for medical exposure. Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation, Safety Guide. IAEA Safety Standards Series No. SSG-46. Vienna: International

- Atomic Energy Agency (IAEA), 2018.
- 26) 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* 2019; 112: 28-36.
 - 27) Hida T, Yamada Y, Ueyama M, et al. Time-resolved quantitative evaluation of diaphragmatic motion during forced breathing in a health screening cohort in a standing position: dynamic chest phrenicography. *Eur J Radiol* 2019; 113: 59-65.
 - 28) 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* 2017; 24(4): 393-400.
 - 29) 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* 2017; 87: 76-82.
 - 30) Ohkura N, Kasahara K, Watanabe S, et al. Dynamic-ventilatory digital radiography in air flow limitation: a change in lung area reflects air trapping. *Respiration* 2020; 99(5): 382-388.
 - 31) Ohkura N, Tanaka R, Watanabe S, et al. Chest dynamic-ventilatory digital radiography in chronic obstructive or restrictive lung disease. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis* 2021; 16: 1393-1399.
 - 32) Hiasa Y, Otake Y, Tanaka R, et al. Recovery of 3D rib motion from dynamic chest radiography and CT data using local contrast normalization and articular motion model. *Med Image Anal* 2019; 51: 144-156.
 - 33) Tanaka R, Sanada S, Fujimura M, et al. Pulmonary blood flow evaluation using a dynamic flat-panel detector: feasibility study with pulmonary diseases. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2009; 4(5): 449-454.
 - 34) Tanaka R, Sanada S, Fujimura M, et al. Development of pulmonary blood flow evaluation method with a dynamic flat-panel detector: quantitative correlation analysis with findings on perfusion scan. *Radiol Phys Technol* 2010; 3(1): 40-45.
 - 35) Tanaka R, Sanada S, Fujimura M, et al. Ventilatory impairment detection based on distribution of respiratory-induced changes in pixel values in dynamic chest radiography: a feasibility study. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2011; 6(1): 103-110.
 - 36) Tanaka R, Tani T, Nitta N, et al. Pulmonary function diagnosis based on respiratory changes in lung density with dynamic flat-panel detector imaging: an animal-based study. *Invest Radiol* 2018; 53(7): 417-423.
 - 37) Tanaka R, Tani T, Nitta N, et al. Detection of pulmonary embolism based on reduced changes in radiographic lung density during cardiac beating using dynamic flat-panel detector: an animal-based study. *Acad Radiol* 2019; 26(10): 1301-1308.
 - 38) Tanaka R, Matsumoto I, Tamura M, et al. Comparison of dynamic flat-panel detector-based chest radiography with nuclear medicine ventilation-perfusion imaging for the evaluation of pulmonary function: a clinical validation study. *Med Phys* 2020; 47(10): 4800-4809.
 - 39) 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* 2017; 92: 37-44.
 - 40) Yamasaki Y, Abe K, Hosokawa K, et al. A novel pulmonary circulation imaging using dynamic digital radiography for chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *Eur Heart J* 2020; 41(26): 2506. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa143
 - 41) Hanaoka J, Yoden M, Hayashi K, et al. Dynamic perfusion digital radiography for predicting pulmonary function after lung cancer resection. *World J Surg Oncol* 2021; 19(1): 43.
 - 42) Miyatake H, Tabata T, Tsujita Y, et al. Detection of pulmonary embolism using a novel dynamic flat-panel detector system in monkeys. *Circ J* 2021; 85(4): 361-368.
 - 43) Tanaka R, Tani T, Yamada A, et al. Correlations between cardiovascular parameters and image parameters on dynamic chest radiographs in a porcine model under fluid loading. *Radiol Phys Technol* 2021; 14(3): 288-296.
 - 44) Tanaka R, Matsumoto I, Tamura M, et al. Dynamic chest radiography: clinical validation of ventilation and perfusion metrics derived from changes in radiographic lung density by comparison to nuclear medicine imaging. *Quant Imaging Med Surg* 2021; 11(9). doi: 10.21037/qims-20-1217
 - 45) Tanaka R, Samei E, Segars P, et al. Dynamic chest radiography for pulmonary function diagnosis: a validation study using 4D extended cardiac-torso (XCAT) phantom. *Proc SPIE* 10948, Medical Imaging 2019: 109483I; 1-8.
 - 46) 田中利恵, 藤村政樹, 安井正英, 他. 換気-血流量 mismatch 症例を対象とした胸部 X 線動態撮影法による V/Q study の検証. *医用画像情報会誌* 2009; 26(3): 68-72.
 - 47) Watase S, Sonoda A, Matsutani N, et al. Evaluation of intrathoracic tracheal narrowing in patients with obstructive ventilatory impairment using dynamic chest radiography: a preliminary study. *Eur J Radiol* 2020; 129: 109141.
 - 48) Tamura M, Matsumoto I, Saito D, et al. Dynamic chest radiography: novel and less-invasive imaging approach for preoperative assessments of pleural invasion and adhesion. *Radiol Case Rep* 2020; 15(6): 702-704.
 - 49) Tamura M, Matsumoto I, Saito D, et al. Case report: uniportal video-assisted thoracoscopic resection of a solitary fibrous tumor preoperatively predicted visceral pleura origin using dynamic chest radiography. *J Cardiothorac Surg* 2020; 15(1): 166. doi.org/10.1186/s13019-020-01212-0
 - 50) Tanaka R, Samei E, Segars WP, et al. Assessment of pleural invasion and adhesion of lung tumors with dynamic chest radiography: a virtual clinical imaging study. *Med Phys* 2021; 48(4): 1616-1623.
 - 51) Sanada S. Functional dynamic radiography with computer analysis-for physiological chest imaging and kinematic joint imaging. *Quant Imaging Med Surg* 2017; 7(6): 698-706.
 - 52) 梶迫正明, 真田茂, 池田和夫, 他. 手関節側面 X 線動画画像の解析: 掌背屈運動における関節動態. *信学技報* 2003; 103(409): 29-34.
 - 53) Sakuda K, Sanada S, Tanaka R, et al. Functional shoulder radiography with use of a dynamic flat-panel detector. *Radiol Phys Technol* 2014; 7(2): 254-261.

問合せ先

〒920-0942 金沢市小立野 5-11-80
金沢大学医薬保健研究域 田中利恵