

Tidal recruitmentを 胸部X線動態撮影 (DCR) で疑い 呼吸管理に役立てたARDSの1例

宮崎裕也

KEY WORDS Tidal recruitment, VILI, 胸部X線動態撮影, DCR, Δ pixel value%

要 約

70歳代男性、市中肺炎で入院し第2病日に重症急性呼吸窮迫症候群 (acute respiratory distress syndrome : ARDS) で気管挿管となった。圧規定換気にて Δ 吸気圧 $4\text{cmH}_2\text{O}$ 、PEEP $10\text{cmH}_2\text{O}$ としたがP/F比 71と低値であった。精査のため胸部X線動態撮影 (dynamic chest radiography : DCR) を実施した。DCRでは吸気終末に対して呼気終末で浸潤影の範囲拡大と濃度上昇を認めた。また肺野の呼吸性濃度変化であるピクセル値の呼吸性変動率 (Δ pixel value%) を解析すると、右下肺野外側が17.2%と最も高く、呼気終末に気管支透亮像を伴う浸潤影が出現していた。一方、吸気終末は気管支透亮像が軽減しており、tidal recruitmentと考えた。酸素化改善と人工呼吸器関連肺傷害 (ventilator-induced lung injury : VILI) リスク軽減のため腹臥位療法を行い、第3病日はP/F比 273、呼気終末の浸潤影も範囲縮小と濃度低下を認めた。右下肺野外側の Δ pixel value%は9.8%に低下、呼気終末の気管支透亮像も消失し、tidal recruitmentは軽減したと考えた。DCRは動的病態であるtidal recruitmentの推測・VILI回避に役立つ可能性がある。

I はじめに

肺胞の虚脱と再開通を繰り返すtidal recruitmentは、人工呼吸器関連肺傷害 (ventilator-induced lung injury : VILI) の機序とされる。しかし実臨床ではtidal recruitmentの可視化は容易ではなく、VILI回避に活用されていない。

胸部X線動態撮影 (dynamic chest radiography : DCR) はX線をパルス状 (15 frames per second) に照射し、胸部X線画像を動画 (10~15秒間) として表示する¹⁾。動画構築のほか、換気や血流分布の自動解析や肺野面積・横隔膜移動距離を自動算出することでの動的機能評価が可能である¹⁾。わが国では2018年から臨床使用され、2022年からはポータブルでの撮影が可能となり^{1,2)}、救急・集中治療でも利用されつつある。

今回、DCRでtidal recruitmentを疑い、VILI回避に役立てた急性呼吸窮迫症候群 (acute respiratory distress

syndrome : ARDS) の1例を経験したので報告する。

II 症 例

症例 : 70歳代男性、158cm、58kg

主訴 : 呼吸苦

併存症 : 糖尿病、高血圧、狭心症

病歴 : 第1病日に呼吸苦・発熱を自覚され、近医にて単純X線画像で右中下肺野の浸潤影を認め、市中肺炎の疑いで当院に転院搬送された。CTでは右中下葉を中心に一部consolidationを伴うすりガラス陰影を認め、病変は左下葉にも及んでいた。SpO₂ 50% (室内気) と酸素化不良のためICU入室した。

ICU入室時現症 : Glasgow Coma Scale E4V5M6、血圧146/70mmHg (ノルアドレナリン $0.07\mu\text{g/kg/分}$)、脈拍85回/分、呼吸数 30回/分、SpO₂ 92% (リザーバーマスク酸素 10L/分投与下)、体温 37.8℃、両側肺に水泡音聴取

動脈血液ガス分析 (リザーバーマスク酸素9L/分投与下) : pH 7.48、PaCO₂ 34.1mmHg、PaO₂ 55.2mmHg、BE 2.0

戸田中央総合病院 麻酔科

[受付日 : 2025 年 1 月 9 日 採択日 : 2025 年 6 月 30 日]

Tidal recruitmentを胸部X線動態撮影 (DCR) で疑い呼吸管理に役立てたARDSの1例

mEq/L、乳酸 1.1mmol/L

血液生化学検査：WBC 14,930/ μ L、RBC 319万/ μ L、Hb 10.1g/dL、Ht 30.1%、Plt 19.6万/ μ L、AST 28IU/L、ALT 16IU/L、LDH 377IU/L、CK 156IU/L、Cre 0.61mg/dL、CRP 11.27mg/dL、BNP (brain natriuretic peptide) 240.5 pg/mL、プロカルシトニン 0.18ng/mL、プロトロンビン時間 国際標準比1.18、活性化部分トロンボプラスチン時間 27.3秒、KL-6 (Sialylated carbohydrate antigen-6) 481 U/mL、SP-D (surfactant protein D) 402.3ng/mL、 β -D グルカン<5.0pg/mL、インフルエンザ抗原 (-)、新型コロナウイルス抗原 (-)、尿中肺炎球菌抗原 (-)、尿中レジオネラ抗原 (-)

喀痰培養：*a*-streptococcus少数

ICU入室後経過：第2病日の早朝にはリザーバーマスク酸素13L/分でSpO₂ 80%と酸素化が低下した。単純X線画像で両肺のすりガラス陰影が浸潤影に悪化したため、同日に気管挿管となった。人工呼吸器はNKV-550 (日本光電工業、日本) で換気モードは圧制御量規定 (pressure regulated volume control : PRVC)、V_T 500mL、呼吸数 12 回/分、PEEP 8cmH₂Oで開始したが、最高気道内圧は28 cmH₂Oで4時間後のP/F比は54で重症ARDSとなった。また鎮静はフェンタニルとミダゾラムでRASS (richmond agitation sedation scale) -3から-4に調整したが、努力様呼吸による非同調が生じていた。圧規定換気 (pressure control ventilation : PCV)、 Δ 吸気圧 4cmH₂O (V_T 540 mL)、PEEP 10cmH₂Oに変更したが、努力様呼吸は続きP/F比も71と低値であった (図1)。低酸素血症の病態把握のためベッドサイドでDCRを実施した。DCRでは浸潤影が極端な呼吸性変化を示し、吸気終末 (図2-a) に比べ呼気終末 (図2-b) で浸潤影の範囲が拡大し濃度も上昇した。

デジタルX線画像の濃淡は画像を構成する最小面積単位 (ピクセル) ごとのピクセル値で表され、DCRでは任意の関心領域における平均ピクセル値を表示できる。そこで本例の肺野局所の呼吸性濃度変化を比較するため、DCR画像の左右肺野を肺尖部から肺底部にかけ三等分し、さらに内外側を二等分した6領域 (左側は5領域) に区分し (図3)、各領域の平均ピクセル値の呼吸性変動率 (Δ pixel value% = 呼吸性pixel変動幅/吸気終末pixel値) を解析した (図4)。R2、R6、L6において Δ pixel value% がそれぞれ16.4%、17.2%、16.0%と高値で、呼吸性濃度変化がより顕著であった (図5)。また Δ pixel value% が最も高値であったR6領域では、呼気終末 (図2-b) に浸

潤影内部の気管支透亮像を明瞭に認めた。吸気終末 (図2-a) には浸潤影濃度が低下し、気管支透亮像も消失したことから虚脱再開通 (tidal recruitment) を生じていると考えた。

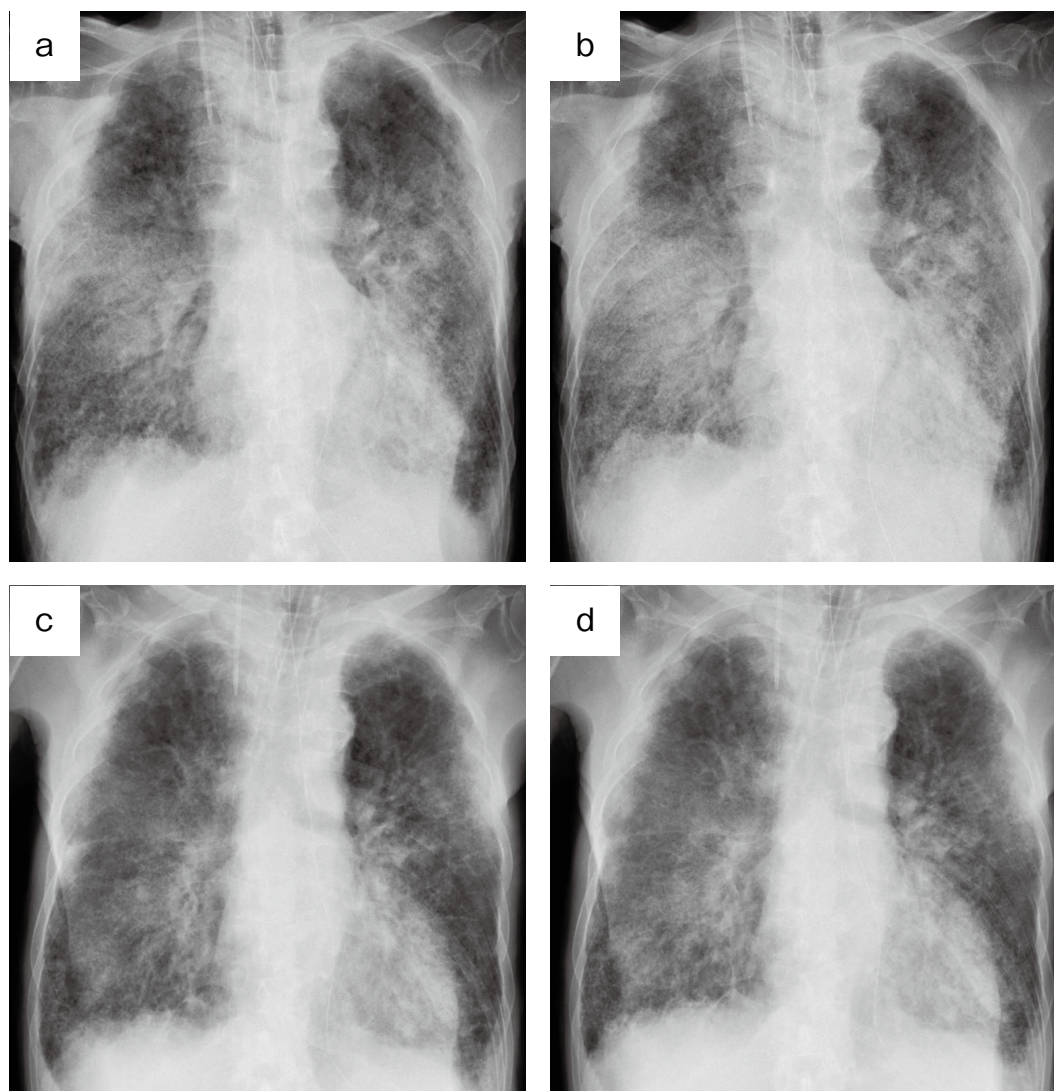
鎮静薬増量のうえでPEEP 30cmH₂Oでリクルートメントを実施し、PCV、 Δ 吸気圧 10cmH₂O (V_T 550mL)、PEEP 14cmH₂Oに変更したが、P/F比 83と酸素化はわずかな改善であった。すでに最大吸気圧 24cmH₂OでPEEP 14cmH₂Oと高めで、 Δ pixel value%の高い領域を両肺に認めていたことから、同日より腹臥位療法 (19時間) を実施し酸素化改善とVILI回避を図った。第3病日 (腹臥位後) はP/F比 273と上昇し、DCRの浸潤影はとくに呼気終末 (図2-d) で範囲縮小と濃度低下を認め、R6領域の気管支透亮像も消失した。 Δ pixel value%は全区域において低下し、とくにR2、R6、L6では顕著であった (図5)。

腹臥位療法は第4病日にて終了し、持続気道陽圧 (continuous positive airway pressure : CPAP) に移行した。同日以降にPEEPを漸減し、PEEP 5cmH₂Oにて酸素化が安定した第9病日に抜管・呼吸器離脱した (図6)。

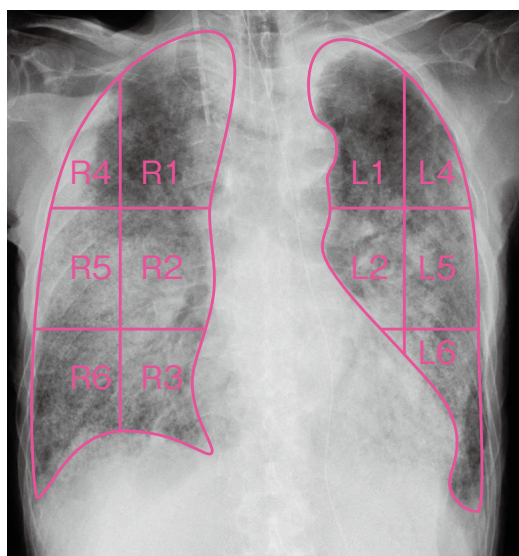


図1 気管挿管4時間後の胸部単純X線静止画 (吸気)
PCV、 Δ 吸気圧 4cmH₂O (V_T 540mL)、PEEP 10cmH₂O、P/F 比 71。

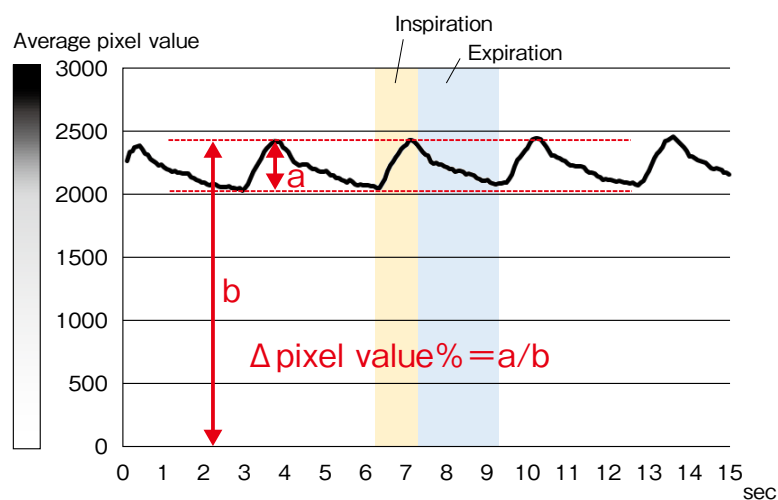
Tidal recruitmentを胸部X線動態撮影 (DCR) で疑い呼吸管理に役立てたARDSの1例

**図2 DCR**

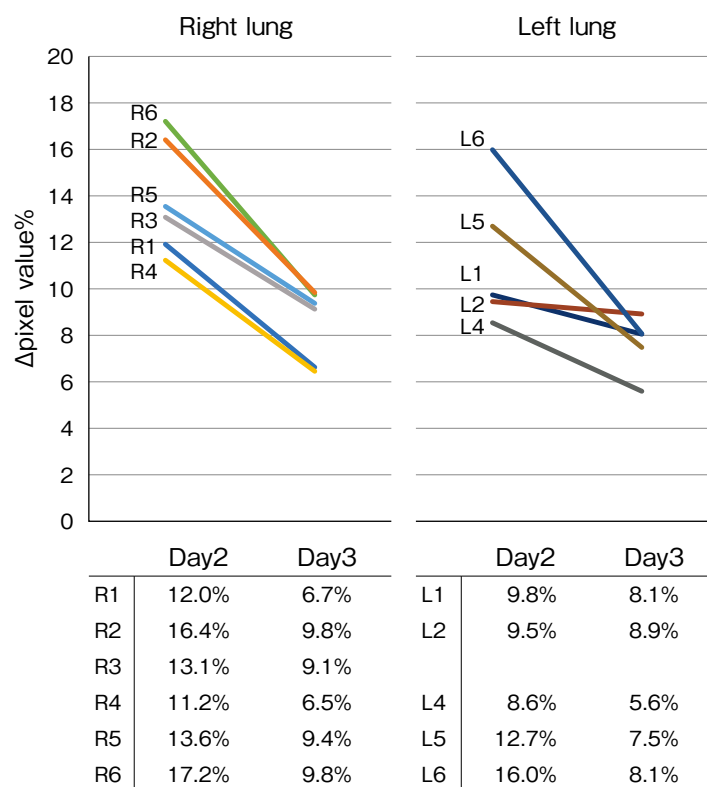
- a. 第2病日 (吸気終末)、b. 第2病日 (呼気終末)。
PCV、 Δ 吸気圧 $4\text{cmH}_2\text{O}$ (V_T 540mL)、PEEP $10\text{cmH}_2\text{O}$ 、P/F比 71
c. 第3病日 (吸気終末)、d. 第3病日 (呼気終末)。
PCV、 Δ 吸気圧 $10\text{cmH}_2\text{O}$ (V_T 540mL)、PEEP $14\text{cmH}_2\text{O}$ 、P/F比 273

**図3 DCRの肺野を右側6領域・左側5領域に区分**

Tidal recruitmentを胸部X線動態撮影（DCR）で疑似呼吸管理に役立てたARDSの1例



■図4 各領域における平均ピクセル値の呼吸性変動率
 (Δpixel value%=呼吸性pixel変動幅/吸気終末pixel値)



■図5 第2、3病日における各領域のΔpixel value%

Tidal recruitmentを胸部X線動態撮影（DCR）で疑い呼吸管理に役立てたARDSの1例

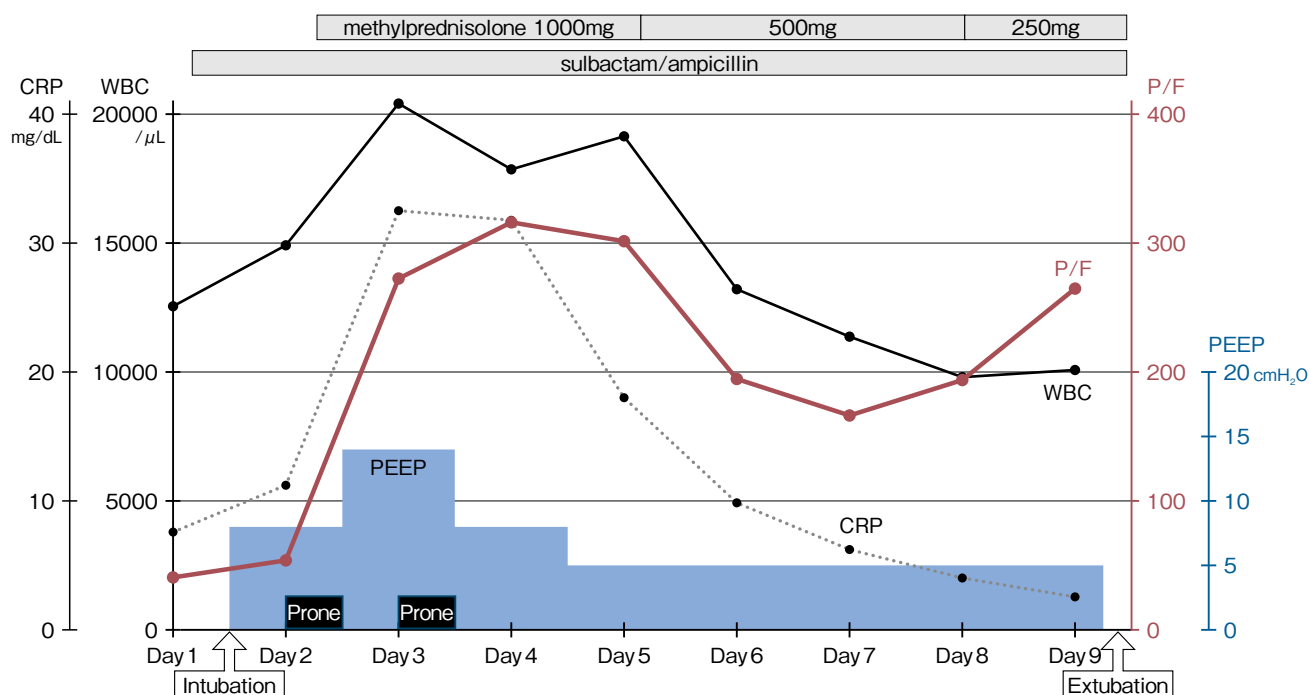


図6 入室後経過

Ⅲ 考 察

従来の単純X線画像は静止画だが、DCRはX線動画を構築するため呼吸の動的病態が可視化される。DCRの肺野では呼吸性に濃度が変化し、吸気で肺野濃度が低下し呼気で上昇する。この呼吸性の肺野濃度変化は、慢性閉塞性肺疾患（chronic obstructive pulmonary disease : COPD）や無気肺で減少する^{3,4)}。とくにCOPDでは呼気肺過膨張の悪化とともに呼吸性肺野濃度変化が減少することから、COPDの診断や重症度評価に有用とされる⁴⁾。一方、肺野濃度変化が増大する病態については、研究がない。

本例では市中肺炎の病原体は特定できなかったものの第2病日に重症ARDSを発症し、DCRでは浸潤影の極端な呼吸性濃度変化を認めた。これは呼気相ではARDSによる肺水腫と努力様呼気により肺胞虚脱が悪化し、吸気相ではΔ吸気圧と努力様吸気で経肺圧が上昇し肺胞虚脱の軽減により、呼吸性濃度変化が増大したと考える。また呼気終末（図2-b）のR6領域には浸潤影の濃度上昇に加え、気管支透亮像を明瞭に認めた。気管支透亮像は気管支周囲の肺組織の含気消失により出現⁵⁾することから、本例では呼気の浸潤影は無気肺の状態であったと考える。一方、吸気終末（図2-a）では浸潤影の濃度低下と気管

支透亮像の消失を認め、呼吸性に虚脱と再開通を繰り返すtidal recruitmentを来していた可能性がある。

また、第2病日から第3病日にかけて呼気終末（図2-b、d）の浸潤影の濃度が改善するにつれ、P/F比も上昇した。Tidal recruitmentでは呼気に生じる肺胞虚脱により呼気の肺内血流シャント率が増加し、PaO₂がより低下する⁶⁾。第2病日は呼気肺胞虚脱でP/F比が低下していたが、第3病日には呼気肺胞虚脱が改善したことでP/F比が上昇したと考える。

DCRは動態画像構築のほか機能解析ができ、近年では呼吸性肺野濃度変化の数値化について研究が進んでいる^{4,7)}。デジタルX線画像ではX線透過性の度をピクセル値で表し、含気の多い肺野ではX線透過性が高くピクセル値も高値で、肺炎など浸潤影ではいずれも低値となる。Δpixel value%はピクセル値の呼吸性変動率で、呼吸性の肺野濃度変化の程度を表す。正常肺における研究ではΔpixel value%と一回換気量の相関係数は0.99以上で、換気量が増加するとΔpixel value%は上昇し、閉塞性無気肺では低下する³⁾。虚脱再開通に関する研究はないものの、豚を対象とした研究では安静換気でのΔpixel value%の平均は4.8%と報告され³⁾、本例ではtidal recruitmentが疑われた第2病日のΔpixel value%は17.2%（R6領域）と高値であった。呼気の肺胞虚脱では放射線透過

Tidal recruitmentを胸部X線動態撮影（DCR）で疑い呼吸管理に役立てたARDSの1例

性が低くピクセル値が低下する一方、虚脱が再開通した吸気ではピクセル値が上昇したことで、呼吸性のピクセル値変動が大きくなり Δ pixel value%が高値を示したと考える。また、肺胞虚脱が軽快したと考える第3病日には Δ pixel value%は9.8%（R6領域）まで低下しており、 Δ pixel value%は虚脱再開通を反映する可能性がある。

DCRは関心領域における呼吸性濃度変化を数値化できることから、客観的な局所比較や経時比較にも利用できる。本例では第2病日において Δ pixel value%の高い領域がR2、R6、L6と両肺に散在し、さらに同一肺でもR2、R6と内外側に分布し、肺内のさまざまな部位で呼気肺胞虚脱が生じていると考えた。そのため理学療法には前傾側臥位ではなく腹臥位を選択し、両肺の呼気肺胞虚脱の改善を図った。腹臥位翌日にはR2、R6、L6で Δ pixel value%が最も低下し、全区域の Δ pixel value%のばらつきも減少し（図5）、肺内で不均一に生じていた呼気肺胞虚脱が軽快したと考えた。

呼吸性肺野濃度変化の解釈には、留意を要する。DCRの肺野濃度は肺血管や気管支の量に起因し¹⁾、撮影時の線量や撮影角度・構造物の重なり具合にも影響を受けるため、呼気の肺野濃度上昇が肺胞虚脱を示すとは限らない。また、 Δ pixel value%は肺野濃度の動的な変動率のため、 Δ pixel value%が高値であっても肺胞虚脱や再開通という病態を含まない可能性もある。しかし、本例の第2病日では Δ pixel value%高値に加え、呼気に気管支透亮像を伴う浸潤影増強と低酸素血症を認めていたことからtidal recruitmentの可能性が高いと考えた。

IV おわりに

従来、単純X線静止画から様々な病態を推測し、呼吸管理・治療戦略を組み立てていた。DCRは呼吸病態の動机的かつ客観的評価・比較が可能であり、tidal recruitmentの推測やVILI回避に役立つ可能性がある。

本稿の要旨は第46回日本呼吸療法医学会学術集会（2024年、山形）において発表した。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) 田中利恵：X線動画撮影システムの最新動向および将来展望 技術開発と臨床研究の最前線. INNERVISION. 2023；38：25-8.
- 2) 佐藤 優：回診用/移動型X線撮影装置の最新動向および将来展望 ベッドサイドでのX線動画撮影を可能にする動態回診車の救急・集中治療領域における使用経験. INNERVISION. 2023；38：45-8.
- 3) 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. Investigative Radiology. 2018；53：417-23.
- 4) Wada N, Tsunomori A, Kubo T, et al：Assessment of pulmonary function in COPD patients using dynamic digital radiography. European Journal of Radiology Open. 2024；13：100579.
- 5) 梁川雅弘, 秦 明典, 富山憲幸：呼吸器疾患の鑑別診断－「基本画像パターン」, 「病態」, 「経過」－読影に必要な用語について. 呼吸器ジャーナル. 2020；68：6-12.
- 6) Cronin JN, Crockett DC, Perchiazzi G, et al：Intra-tidal PaO₂ oscillations associated with mechanical ventilation：a pilot study to identify discrete morphologies in a porcine model. Intensive Care Med Exp. 2023；11：60.
- 7) 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 compared to nuclear medicine imaging. Quant Imaging Med Surg. 2021；11：4016-7.