

脳死左片肺移植術後呼吸管理に胸部デジタルX線動態撮影が有用であった1症例

齋藤宏樹¹⁾・金谷明浩¹⁾†・田中捷馬¹⁾・田中亜美²⁾・入間田大介²⁾・小林直也²⁾・紺野大輔²⁾・山内正憲²⁾

KEY WORDS ● 脳死片肺移植術, 胸部デジタルX線動態撮影, 横隔膜機能障害

要旨

近年、適応年齢上限に近いフレイル合併の肺移植症例が増加し、術後の人工呼吸器離脱が困難となる例が多い。左片肺移植術後患者において、胸部デジタルX線動態撮影 (dynamic digital radiography : DDR) を用い、肺野および横隔膜の動態を経時的に評価した。術後早期のDDRでは両側上中肺野の換気低下および右Native lung横隔膜機能障害を認め、これをもとに気管切開術を速やかに施行し、呼吸リハビリテーションへ移行した。その後、DDRによる解析で換気・横隔膜運動の改善を経時的に確認し、人工呼吸器から離脱した。DDRは脳死片肺移植術後の換気低下および横隔膜機能障害を可視化し、呼吸管理やリハビリ方針の決定を支援する有用な評価法であることが示唆された。

I はじめに

近年、適応年齢の上限に近い肺移植症例 (両側 : 55歳未満、片側 : 60歳未満) が増加している。これらの症例では、術前からの重症呼吸不全に伴う身体活動制限によるフレイルやサルコペニアが進行していることが多い。さらに、虚血再灌流障害による肺浮腫、横隔膜機能障害、術後出血など肺移植術後特有の多彩な要因が理由で、人工呼吸器からの離脱が困難となる場合が少なくない¹⁾。それゆえ、術後の呼吸状態を客観的かつ的確に評価できるデバイスの導入が切望されていた。

新たな画像診断技術として胸部デジタルX線動態撮影 (dynamic digital radiography : DDR) がわが国で開発され、肺野および横隔膜の動きを動的に可視化することが可能となった²⁾。今回、脳死片肺移植術後患者において、DDRによる画像評価が気管切開術施行の判断、人工呼吸器離脱および呼吸リハビリテーションの効果判定に有用であった症例を経験したので報告する。

II 症例

症例 : 50歳代女性、身長155.0cm、体重32.5kg。

1) 東北大学病院 麻酔科

2) 同 集中治療部

†責任著者

[受付日 : 2025年11月13日 採択日 : 2026年4月23日]

既往歴 : 気管支喘息、右気胸。

現病歴 : 10年前、胸部CTで両側胸膜肥厚、肺容量減少、牽引性気管支拡張を指摘された。6年前、労作時呼吸困難、易疲労感、体重減少を自覚し、特発性胸膜肺実質繊維弾性症の診断のうえ、2年前より脳死登録された。

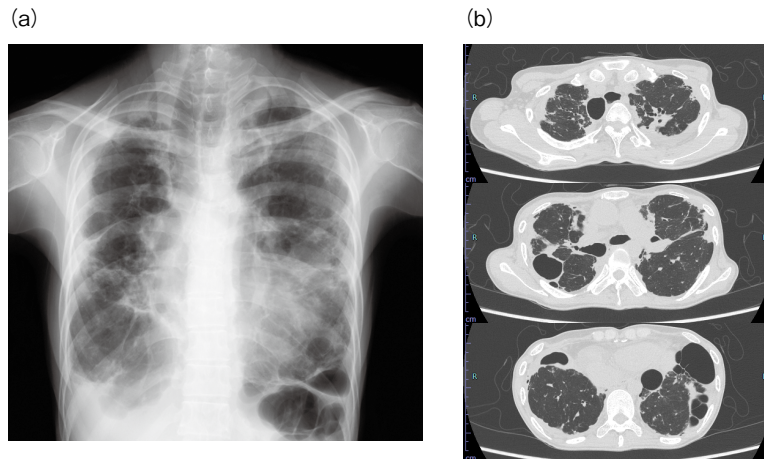
入院時現症 : 体温 35.9℃、BP 112/70mmHg、脈拍 96回/分、呼吸数 25回/分、SpO₂ 95% (鼻カニューラ 1.5L/分)。

術前検査 : 動脈血液ガス分析 (鼻カニューラ 1.5L/分投与下) : pH 7.328、PaCO₂ 78.7mmHg、PaO₂ 130mmHg、HCO₃⁻ 40.1mEq/L。

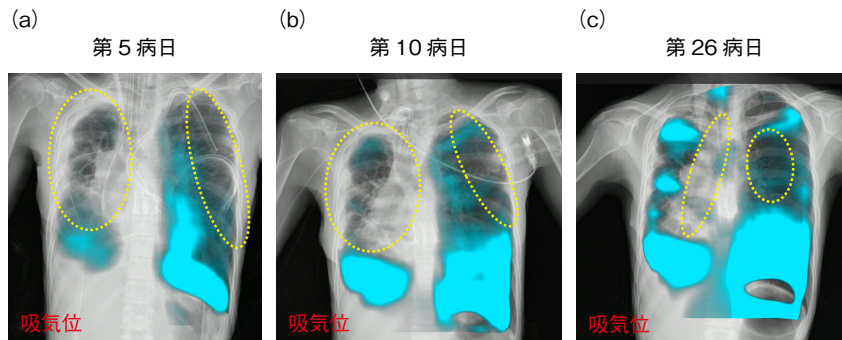
画像所見 : 胸部単純X線および胸部CTで両側胸膜肥厚、肺野全体に間質性変化を認めた (図1a、b)。経胸壁心臓超音波検査ではTricuspid Regurgitation Pressure Gradient 60mmHg、D-shapeを認め、右心負荷所見が示唆された。

経過 : 全身麻酔下に脳死左片肺移植術が施行された。ヘミクラムシエル開胸で行われ、上行大動脈送血・右大腿静脈経由右房脱血によるcentral veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation (V-A ECMO) を確立した後、左肺が摘出され、移植肺が移植された。左片肺移植後に呼吸循環が安定していたために、V-A ECMOを離脱した。離脱後も酸素化悪化・呼吸性アシドーシスなどは認めなかったが、虚血再灌流障害に伴う移植肺の浮腫が強く、滅菌ドレープを一時的に置いて胸骨や肋間を仮

脳死左片肺移植術後呼吸管理に胸部デジタルX線動態撮影が有用であった1症例

**図1** 胸部単純X線および胸部CT画像

- (a) 術前胸部X線
(b) 術前胸部CT



青色グラデーション部分：呼吸に伴う信号値変化が抽出された部位
点線で囲まれた部位：換気低下を示唆

図2 PL-MODEによる評価

PL-MODE：呼吸に伴う肺野内濃度変化を抽出。グラデーション部分は呼吸に伴う信号値変化が抽出された部位である。

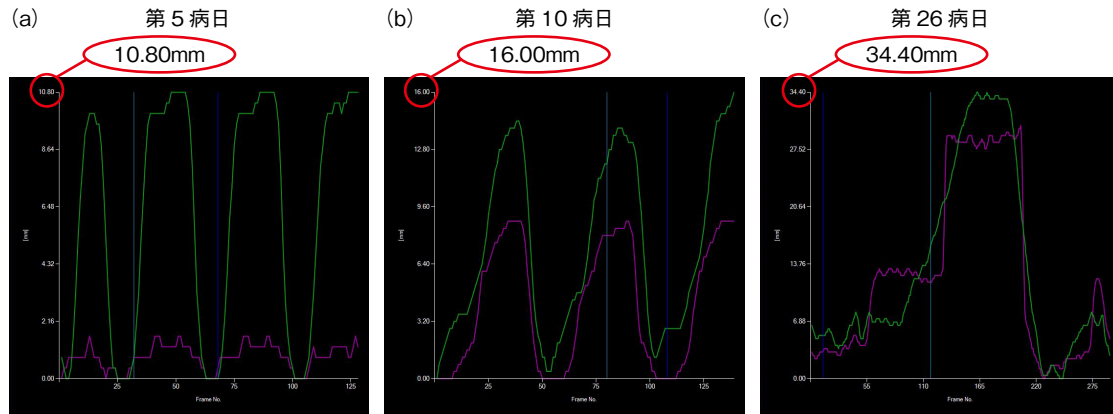
- (a) 換気信号が両側上中肺野を中心に低下していた。さらに、右Native lungの換気低下が著しかった。
(b) 両側換気低下部位の換気信号の改善が認められた。
(c) 両側上中肺野の換気信号も改善が認められた。

閉鎖（仮閉胸）して終了した。麻酔時間は482分、手術時間は365分、ECMO管理時間は183分であった。出血量は746mL、術中輸液量は2,674mLであった。術中輸血量は濃厚赤血球液4単位、新鮮凍結血漿 8単位、濃厚血小板液 20単位であった。

術後、仮閉胸にて人工呼吸管理が継続された。経過中の酸素化・呼吸性アシドーシスの増悪を認めず、移植肺の浮腫も軽減したため第4病日、本閉胸が行われた。第5病日、pressure support ventilation (PSV)、pressure support (PS) 10cmH₂O、PEEP 5cmH₂O、自発呼吸による換気でおよそ30回/分の頻呼吸と呼吸苦の訴えがあった。その後、pressure-controlled assist/control (PC-

AC)、吸気圧 20cmH₂O、PEEP 5cmH₂O、呼吸数 24回/分の換気条件でDDRを施行して、肺野の動きをPixel value change-low frequency processing Mode (PL-MODE)にて評価したところ、左移植肺および右Native lungともに上中肺野の動きの著しい低下を認めた（**図2a**）。さらに、横隔膜の動きを評価するDiaphragm Motion Mode (DM-MODE)で右Native lung側の最大吸気位と最大呼気位間における横隔膜の移動量が2mm未満であり横隔膜機能障害を認めたため（**図3a**）、呼吸仕事量の軽減を目的として気管切開術を施行した。日中はPSVによる自発呼吸下の人工呼吸管理とし、呼吸リハビリテーションを開始した。第6病日より運動器リハビリテーションも開

脳死左片肺移植術後呼吸管理に胸部デジタルX線動態撮影が有用であった1症例



緑：左移植側横隔膜の動き、紫：右 Native lung 側横隔膜の動き

図3 DM-MODEによる評価

DM-MODE：連続パルスX線画像から両側横隔膜頂点を自動追跡し、呼吸に伴う頭尾側方向の位置変化を時系列データとして抽出する。各フレームにおける横隔膜頂点の座標変位を算出し、最大吸気位と最大呼気位の差を横隔膜移動量 (mm) として定量化した。グラフのX軸はフレーム数 (経過時間)、Y軸は横隔膜の頭側方向への移動量を示している。

- (a) 右Native lung側横隔膜の動きが左に比べ低下していた。
- (b) 右横隔膜の動きが改善した。
- (c) 横隔膜の動きの左右差も改善した。

始され、呼吸・運動器リハビリテーションが継続された。第10病日にPSV、PS 9cmH₂O、PEEP 5cmH₂Oの換気条件で施行されたDDR (図2b)にて、両側肺野の動きと右Native lung側における横隔膜の動きの改善 (9mm程度、図3b)を確認して、第11病日に人工呼吸器を離脱した。その後、呼吸状態は安定して経過して、第16病日にICUを退室した。第26病日、ICU退室後のフォローアップDDRを施行して、肺野の動きおよび横隔膜の動きのさらなる改善を認めた (図2c、3c)。

III 考察

本症例は、適応年齢上限に近くフレイルを合併した肺移植患者において、DDRを用いて術後の肺野および横隔膜の動態を評価し、気管切開術施行や呼吸リハビリテーションの経過判断に有用であった貴重な1例である。肺移植レシピエントでは、術前から慢性呼吸不全による長期の活動制限により、呼吸筋力の低下やサルコペニアが進行していることが多く、術後に人工呼吸器からの離脱が困難となる症例も少なくない¹⁾。従来、これらの呼吸状態をベッドサイドで動的かつ定量的に評価する方法は限られており、気管切開術の施行判断や理学療法の効果判定、呼吸管理方法の決定に難渋することが少なくなかった。

DDRは、連続パルスX線撮影により数秒間の呼吸運動を動画として取得し、専用解析ソフトウェア (KINOSIS[®]、コニカミノルタ社、日本) を用いて換気に伴う肺野および

横隔膜の動きを可視化・定量化できる。とくにPL-MODEでは、呼吸に伴う肺野の輝度変化を解析し肺野の動きを「見える化」でき、またDM-MODEにより両側横隔膜の移動量を同時に定量評価することが可能である。本症例では、術後早期にDDRを実施することで、両側上中肺野の換気低下およびNative lung側の右横隔膜機能障害が可視化された。片肺移植術後では、移植肺は浮腫や虚血再灌流障害の影響により一時的にコンプライアンスが低下するため、Native lungが過膨張しやすく³⁾、これにより見かけ上の横隔膜機能障害を呈したと考えられた。DM-MODEによる横隔膜移動量の定量評価により、右Native lung側横隔膜の最大吸気位と最大呼気位間における移動量は、第5病日では2mm未満と低値を示し (図3a)、Native lung側の横隔膜機能障害を客観的に捉えた。また、PL-MODEにて両上中肺野の動きの低下を認めた (図2a)。これら客観的な動態画像所見を多職種で共有したうえで呼吸苦とおよそ30回/分の頻呼吸と呼吸苦が出現したため、すみやかに気管切開術を施行する方針とした。気管切開により呼吸仕事量が低減し、鎮静鎮痛薬の必要量も減量され、積極的な呼吸・運動器リハビリテーションの開始が可能となった。右Native lung側横隔膜の最大吸気位と最大呼気位間における移動量は、第10病日には9mm程度 (図3b)へと増加し、さらに第26病日には28mm程度 (図3c)まで改善した。さらに、PL-MODEにおいても第10病日 (図2b)、第26病日 (図2c)に青色グラデーションで示された呼吸に伴う信号変化が抽出された部位の改善

脳死左片肺移植術後呼吸管理に胸部デジタルX線動態撮影が有用であった1症例

傾向を認めた。従来、肺移植術後に生じる横隔膜機能障害は、開胸操作や横隔神経周囲への術操作などの影響により移植側に発生することが多いとされてきた⁴⁾。一方で、本症例では、Native lung側の横隔膜機能障害をDDRにより明らかにしたうえで、PL-MODEによる肺野換気動態およびDM-MODEによる横隔膜運動の経時的改善を確認できたうえに、機能的回復が動態画像として可視化されたために、多職種で円滑に呼吸状態の改善を共有することが可能であった。

肺移植術後の呼吸経過評価には、肺エコー、および電気インピーダンストモグラフィ (electrical impedance tomography : EIT) などの非侵襲的評価法が用いられてきた。肺エコーはベッドサイドで簡便に実施でき、無侵襲かつ繰り返し測定可能であるが、評価者の熟練度に依存しやすく⁵⁾、局所的な情報に限られる。また、EITはリアルタイムに換気分布を把握できるものの、空間分解能が低く、肺野全体を同時に高精度に解析することは困難である。DDRは、数秒間の呼吸運動を動画として取得し、肺全体の肺野の動きや横隔膜運動を定量的かつ視覚的に評価できる点が有用である。とくに片肺移植術後においては、移植肺とNative lungで換気不均衡や横隔膜運動の左右差が生じやすいため、DDRによる呼吸動態評価は極めて有用であると考えられる。一方、連日のルーチン撮影ではなく、治療方針の意思決定が必要な際に限定して施行するなど、被曝の影響も考慮する必要がある。さらに、本症例は単例報告にとどまり、DDRと肺エコーおよびEITとの直接比較を実施していない。また、DM-MODEによる横隔膜運動の評価は、能動的な横隔膜収縮のみを反映するものではなく、肺の膨張や胸郭運動に伴う受動的な移動の影響を受けるため、換気設定とDM-MODEによる横隔膜運動の関係についても不明な点も多い。それゆえ、DDRの肺移植術後呼吸管理における有用性に関しては、今後さらなる検証が必要である。

IV おわりに

本症例では、DDRにより片肺移植術後早期の換気低下と横隔膜機能障害を可視化し、気管切開術の施行判断および呼吸リハビリテーションの経過評価に有用であった。Native lungの横隔膜機能障害を明らかにし、その後の改善を経時的に確認できたことから、DDRは片肺移植術後の呼吸管理方法決定を支援する有用な評価手段であると考えられた。

本稿のすべての著者には規定されたCOIはない。

本症例報告に際し患者本人から同意取得を得ている。本症例は日本老年麻酔学会第37回学術集会 (2025年、栃木県) において報告した。

本症例におけるDDR撮影は、臨床的な必要性に基づき、葉機法で承認された機器を用いて保険診療の範囲内で実施された。撮影に際しては、ICRPの勧告およびJapan DRLs 2025を参照し、放射線診断医との連携のもと、診断に必要な最小限の線量となるよう最適化が図られている。

参考文献

- 1) Hu A, Prosper A, Ruchalski K, et al : Sarcopenia predicts outcomes after lung transplantation in older lung transplant candidates. *Ann Thorac Surg Short Rep.* 2023 ; 1 : 174-8.
- 2) Kanaya A, Tanaka S, Takagi H, et al : Utilization of a Digital Radiographic Imaging System for Assessing Ventilation and Guiding Rehabilitation in a Post-lung Transplant Patient : A Case Report. *Cureus.* 2025 ; 17 : e87955.
- 3) 金谷明浩, 齋藤浩二, 志賀卓弥ほか : リンパ管平滑筋腫症に対する脳死片肺移植術後に生じた再膨張性肺水腫の一例. *日本集中治療医学会雑誌.* 2013 ; 20 : 275-6.
- 4) Hernández-Hernández MA, Sánchez-Moreno L, Orizaola P, et al : A prospective evaluation of phrenic nerve injury after lung transplantation : Incidence, risk factors, and analysis of the surgical procedure. *J Heart Lung Transplant.* 2022 ; 41 : 50-60.
- 5) Pivetta E, Baldassa F, Masellis S, et al : Sources of Variability in the Detection of B-Lines, Using Lung Ultrasound. *Ultrasound Med Biol.* 2018 ; 44 : 1212-6.