



肺エコーの基礎から応用

～COVID-19診療に活かす～

済生会宇都宮病院 救急・集中治療科 ECMOセンター

栃木県救命救急センター

藤田 健亮



はじめに

1910年代後半、潜水艦探知機を目的としたソナーが開発され、魚群探知機・金属探知機が登場した。1940年代前半に医学への応用が始まり、超音波診断法の呼吸器領域への臨床応用は1950年代後半から始まった。当時は画像の正確性が低く、診断に信頼がおけるような検査とはなり得なかった。その後画像性能が上昇し、徐々に呼吸器領域で肺エコー (LUS) の有用性が認められるようになった。レントゲン検査やCT検査では確認しえない、臓器・流体の動きなどが観察でき、現在では不可欠な検査となっている。エコーの小型化、高性能化に伴い、ベッドサイドや外来において手軽に検査を行う“Point of Care”という概念が普及した。本書では、GE社製 Venueの使用経験をもとにLUSの代表的な所見を解説し、実臨床における使用例を紹介する。

I 肺エコーの描出方法

使用プローブ：コンベックス、マイクロコンベックス、リニア、セクタなど。Lung slidingを観察するにはリニアが簡便であるが、慣れればコンベックス、セクタなどでも観察は可能である。

使用プリセット：肺を観察するためのプリセットがあればそちらを使用する。もしないようであればアーチファクト除去をするための設定 (Compound Imageなど) をOffにする。また、フォーカスは胸膜のあたりに設定することにより後述のB-lineは明瞭になる。

肺エコーの描出：肋骨と肋骨の間に胸膜を描出する。その様相がコウモリが羽を広げているように見えるため、Bat signと呼ばれる (図1)。

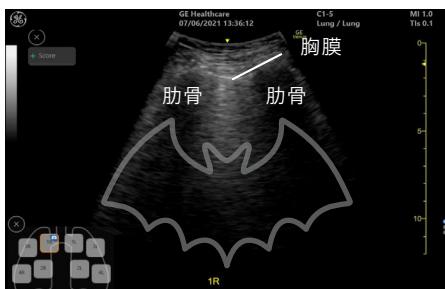


図1: Bat sign

II 肺エコーの代表的所見

<A-line>

肺は通常空気を多く含んでおり、超音波を100%反射する。そのため、胸膜の多重反射像であるA-lineは、胸膜と平行に、等間隔で並んで観察される (図2)。A-lineは、肺エコーの代表的な正常像として知られているが、一方で胸膜下に“異常に”空気が存在することで、この像が増強される。壁側胸膜と

臓側胸膜の間に空気がたまる気胸や、COPDや喘息のようにairtrapが原因で肺の過膨張をきたす場合は、A-lineが増強され観察される。

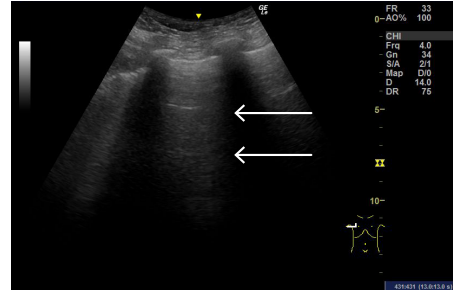


図2: A-line

<B-line>

B-lineは胸膜から垂直に伸びるアーチファクトである (図3)。その所見が見えるメカニズムは解明されていない。特に、Bat signを描出した際に1肋間内に3本以上のB-lineが見えるとき、その様相からlung rocketとも表現される (図4)。また、B-lineは臓側胸膜から伸びるアーチファクトであるため、lung slidingとともに呼吸性に移動する。つまり気胸では、B-lineは消失し、これが気胸を否定する所見としても重要である。

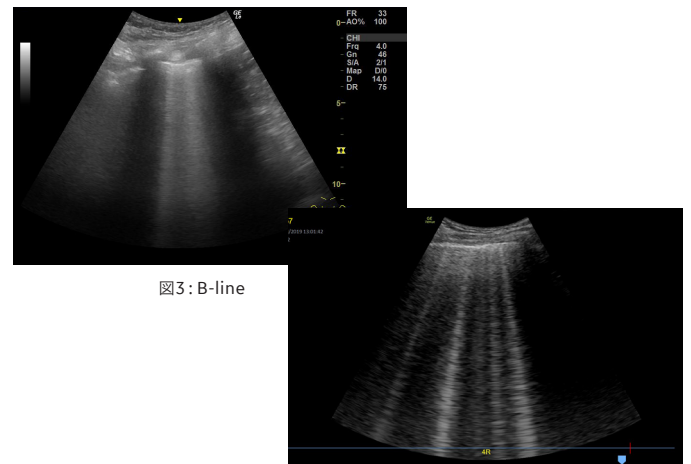


図3: B-line

図4: Lung rocket

また、B-lineが多く観察される様を間質症候群といい、肺水腫、間質性肺炎、細菌性肺炎、など原因は多岐にわたる。間質症候群は、間質性肺炎とはもちろん異義であり、肺エコー独自の表現であることに注意されたい。1肋間に3、4本以上B-lineを示すとき、これは胸膜下小葉間中隔 (subpleural interlobular septa) の肥厚と相関があるとされ、septal rocketsと表現される。また5本以上のB-lineを示すとき、これはglass rocketsと表現され、CT所見でいうスリガラス影と関連し、しばしば多くのB-lineが融合することで、White lungとして観察され、重度の間質症候群である。

また、B-lineと誤認しやすいものがある。これらは、False B-lineともよばれ、E-lineとZ-lineがある¹⁾。E-lineは、皮下気腫 (Subcutaneous Emphysema) が由来の胸膜に垂直にのびるアーチファクトである (図5)。そのため、胸膜からのびるB-lineとは異なり、呼吸とともに動くことがない点からも区別することが出来る。また、Z-lineは80%以上でみられる胸膜から伸びるbundle-shapedなアーチファクトであるが、明確な定義がない。A-lineを打ち消さず、呼吸性な変動がないこともB-lineとは異なる (図6)。

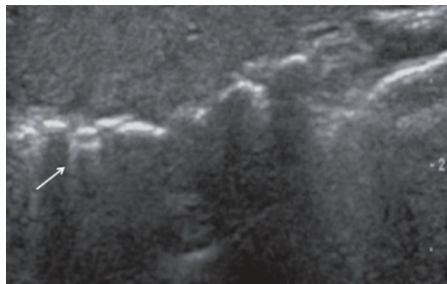


図5: E-line

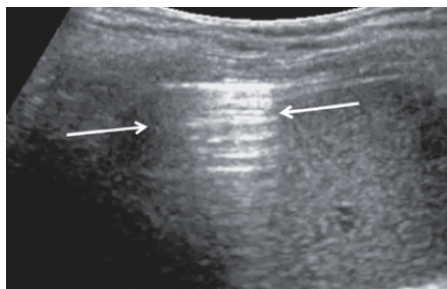


図6: Z-line

<胸膜>

壁側胸膜と臓側胸膜の2枚の胸膜がスムーズにこすれ合うために、エコー上では1本の白い線として描出される。また、そのこすれ合う様子をlung slidingとよぶ (QRcode1)。このlung slidingは、臓側胸膜の呼吸性の変動を反映しているが、時にその有無を判断しにくいときがある。M modeで観察すると、seashore signとして観察される (QRcode2)。



QRcode1: Lung sliding



QRcode2: Lung sliding, seashore

Lung slidingの存在は、つまり2枚の胸膜がスムーズにこすれ合って動くさまを表しているため、気胸 (壁側胸膜を臓側胸膜の間に空気が存在する) の場合は観察できない。このlung slidingの消失を、M modeで観察すると、stratosphere signもしくはbarcode signとして観察される (図7, QRcode3)。気胸を疑う代表的な所見である一方で、lung slidingの消失=気胸ではない (<気胸>を参照)。胸膜の癒着がある場合やCOPDや人工呼吸器管理中の肺の過膨張時には、lung slidingが消失もしくは減弱して観察されることがあるので注意が必要である。また、胸膜の動きに注目した所見として、lung pulseがある。これは、心臓の拍動に合わせて左右に振動するような、壁側胸膜に対する臓側胸膜の動きである (QRcode4)。

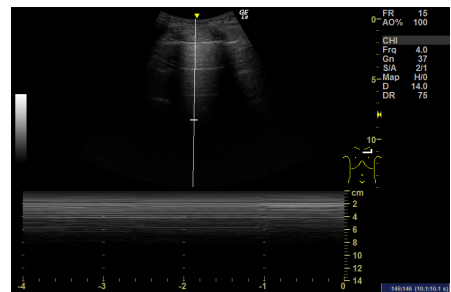


図7: Barcode sign



QRcode3: Lung sliding(-), A-line(+), barcode sign



QRcode4: Lung pulse

また、通常1本のスムーズな線として観察される胸膜は、肺の炎症が波及することで異常な胸膜所見irregular pleural lineとして観察される (図8、図9)。この所見は、ともにB-lineが多く観察される疾患 (群) であるうっ血性心不全 (肺水腫) やARDSの鑑別に有用である (【臨床への応用】を参照)。

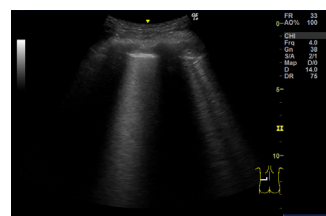


図8: Thickened pleural line

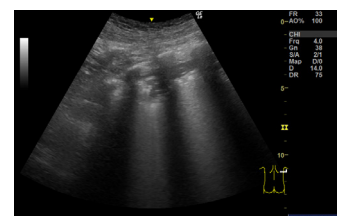


図9: Subpleural consolidation



<PLAPS>

Shred sign(図10)、tissue-like sign(図11)は、ともにconsolidationを表す所見である。これらの異常所見を総称してposterolateral alveolar and/or pleural syndrome(PLAPS)といい、読んで字のごとく後背側(Posterolateral)でよく観察される。PLAPSがよく観察される場所をPLAPS point(図12)という。Consolidationの98%は胸壁に接していることから、90%はPLAPS pointで観察される。

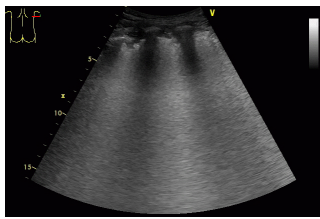


図10: Shred sign

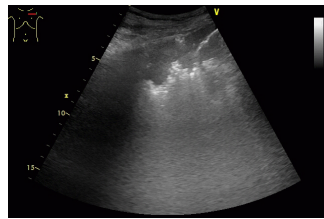


図11: Tissue-like sign

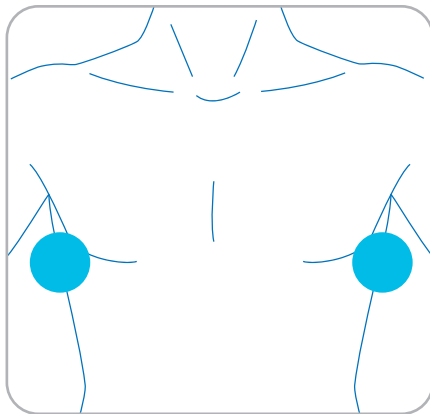


図12: PLAPS point

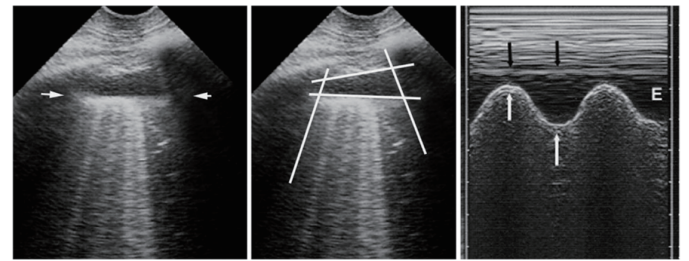


図13: Sinusoid sign
(Relevance of lung Ultrasound in the Diagnosis of Acute Respiratory Failure
* The BLUE Protocol. より引用)

エコーでは、胸水の性状を判別することも可能であり、漏出性胸水は均一なanechoicであるのに対して、滲出性胸水や血胸は内部に高輝度なエコー所見を伴うことがある(図14)。また、レントゲンでは描出されない胸腔内隔壁を、エコーでは容易に描出できる(図15)。

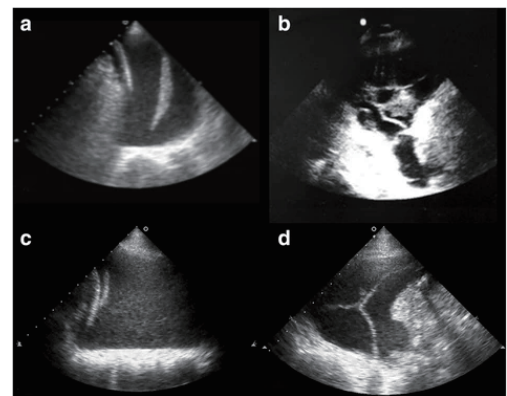


図14: 様々なタイプの胸水エコー所見: a.滲出性、b.膿胸、c.血胸、d.隔壁を伴う複雑性胸水
※Brogi et al. Critical Care (2017) 21: 325 のFigure5を引用

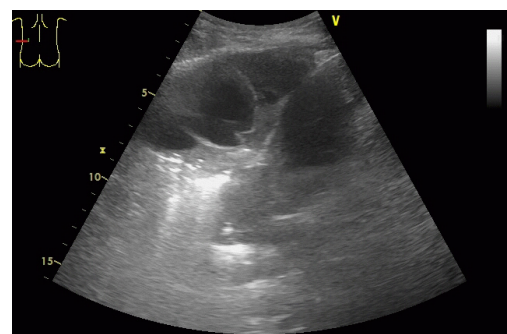


図15: 胸腔内隔壁

III さまざまなエコー所見

<胸水>

壁側胸膜と臓側胸膜の間にみられるエコーフリースペースであり、特に隣接する肋骨のシャドーに囲まれた四角いエリアをquad signとよぶ。またその様子をM modeで観察すると、臓側胸膜が呼吸性に動くさまがsine curveを描くように描出され、sinusoid signと表現される(図13)。これにより、呼吸性変動中の両胸膜間の距離も測定可能であり、胸腔穿刺をする際の指標ともなりうる。

胸水有無の判断に悩んだ際は、spine sign(図16)を参考にするとよいだろう。横隔膜の上下に伸びる高輝度なエコーは椎体を表しているが、“通常”肺に含気がある場合は、横隔膜上の椎体は観察できない。横隔膜上の椎体が観察できること(=spine sign 陽性)、それはすなわち胸水の存在を示唆する所見となる。

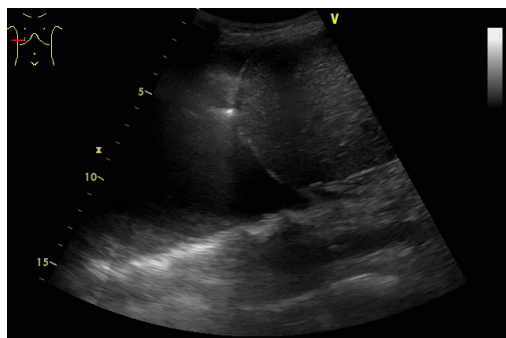


図16: Spine sign

LUSは胸水の量を推定することも可能であり、後背側胸壁と肺の距離が50mm以上であるとき、胸水の量は500ml以上と推定される²。Consolidationや胸水の検出、その量の推定に関しては、LUSはCTと同等の精度があり³、胸部レントゲン検査で透過性が低下した所見を見つけた場合は、エコーを行うことで容易に胸水とconsolidationの鑑別が可能である。

<無気肺>

レントゲンでみられる浸潤影の原因はさまざまであるが、エコーでリアルタイムに観察することにより、そのconsolidationの原因がpneumoniaとobstructive atelectasisかを鑑別することが出来る⁴。気管支に閉塞機転がないconsolidationの場合、気管支内のairが移動するようすが高輝度な成分として観察され、またそれをM modeで観察すると、sinusoidal lineとして観察されこれをdynamic air bronchogramという。この所見は、consolidationがpneumoniaによるものか obstructive atelectasisによるものかを区別する所見として有用とされ、前者を強く疑う所見となる⁴。

また、レントゲンで完全に肺が虚脱する像が得られるまでには、トラップされた空気が肺胞で吸収される過程を経るため時間を要する。一方で、lung sliding消失は、無気肺形成の初期の所見として有用であり、例えば気管挿管直後における片肺挿管の検出にも優れている⁵。他にも、lung slidingの消失+lung pulseの顕在化やstandstill cupolaがobstructive atelectasisのearly signとして有用である。

<気胸>

気胸は、臓側胸膜と壁側胸膜の間に空気がたまる病態である。よって、胸膜が接していることで見える以下の3つの所見が確認できれば、気胸を否定できる。

- 1 Lung sliding
- 2 Lung pulse
- 3 B-line

また、気胸の確定診断には、lung pointの検出が必要である(QRcode5)。Lung pointは、呼吸性変動のある臓側胸膜とそれがない壁側胸膜が同時に見える箇所である。前胸部でlung slidingが消失している場所を見つけたら、そこから背側に向けてプローブを動かすことでlung pointを探すことができる⁶(図17)。重症患者のレントゲン施行はしばしば臥位で行われるため、気胸の程度をフォローすることが難しいことがある。Lung pointは、気胸の診断のみならず、経過のフォローや治療効果判定としても有用である。

横隔膜直上にプローブを当てた時、肝臓もしくは脾臓に呼吸性に変動する肺が覆いかぶさるように見える(肝臓や脾臓が呼吸性に見えなくなる)様子を、curtain signとよぶ。同部位における気胸の否定となる(QRcode6)。

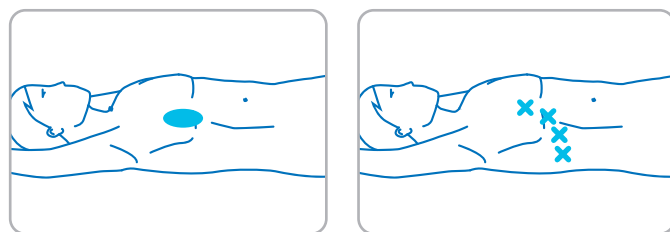


図17: Lung pointの検出



QRcode5: Lung point



QRcode6: Curtain sign



IV 実践への応用<COVID-19>

胸膜直下から広がるすりガラス影が代表的な所見ではあるが、特に初期には画像所見に乏しいこともあり、CTを施行してもCOVID-19肺炎の確定診断、除外診断が確実にできるわけではない。肺病変も、すりガラス影がメインであった初期から、一週間から二週間くらいの経過で網状影やconsolidation、またそれらが混在したさまざまな病変に変化していく。これらのCOVID-19肺炎に特徴的な所見や随伴所見は、エコーでも観察できる。胸膜直下から病変が出現し進行するCOVID-19肺炎では、胸膜の所見が特徴の一つでもある。異常な胸膜所見は、irregular pleural lineといわれ、炎症による胸膜の肥厚はthickened pleural lineとして観察される(図18)。

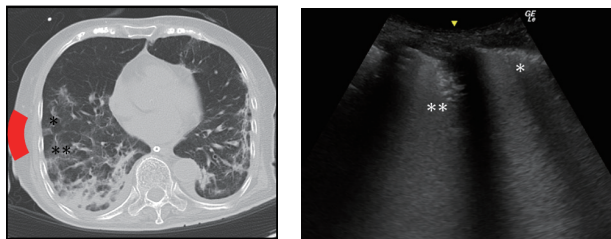


図18: CTとエコー所見を示す。*はエコーではthickened pleural lineとして観察され、隣の肋間では**のようにsubpleural consolidationが観察される。このように、病変が散在性であることも、COVID-19肺炎のひとつの特徴である。 :プローブポジション

また病変が進行すると、胸膜直下に小さい局所のconsolidation (subpleural consolidation)としても観察される(図19)。すりガラス影はB-lineとして観察され、その程度により単発のB-lineから複数本(diffuse/multifocal B-line)、そして癒合し(coalescent B-lines) White lung (図20)、最終的にtissue-like sign (hepatization)として観察される(図21)。また、胸水がまれなのも特徴のひとつである。これらの所見を、COVID-19肺炎の病期に沿って、図22に示す。

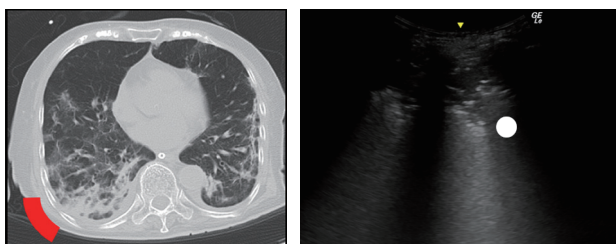


図19: 胸膜直下にできた浸潤影は、subpleural consolidationとして描出される。 :プローブポジション



図20: White lung

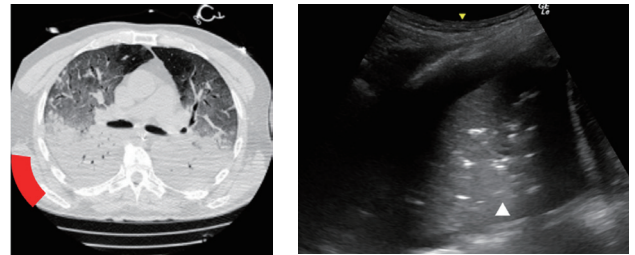


図21: 背側の無気肺は、tissue-like sign (hepatization)として描出される。 :プローブポジション

エコー所見	エコー	評価
1. Irregular pleural line(-) B-line(±)		正常
2. Irregular pleural line(+) B-line(±)		両側散在性であれば初期のCOVID-19疑い
3. Irregular pleural line(+) Multiple B-line(+)		両側散在性であれば初期のCOVID-19の可能性大
4. Irregular pleural line(+) White lung(+)		両側散在性であれば重症ウイルス性肺炎
5. Irregular pleural line(+) Subpleural consolidation(+)		両側散在性であれば超重症ウイルス性肺炎

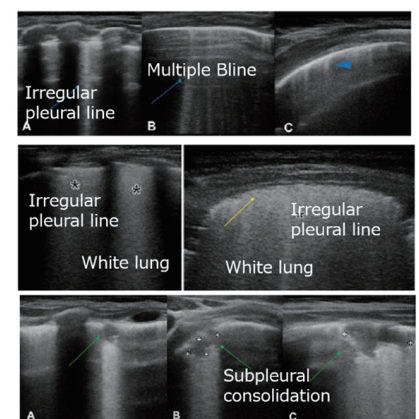


図22: 1. 正常肺では、正常な胸膜がlung slidingを伴い1本のきれいな線で観察される。また、特に腹側～側胸部ではB-lineは観察されず、A-lineが広範囲で観察される。2,3. 胸膜の肥厚や、B-lineが両側散在性に見られると、COVID-19肺炎の疑いとなり、すりガラス影を反映するB-lineが増強しmultiple B-lineとして観察されると、COVID-19の初期の肺炎として疑いがより強くなる。エコー所見としての胸膜の肥厚は、炎症の程度が強くなりまた病変が進行すると、その所見も強くなる。4. それにともない胸膜からのびるB-lineは、次第に本数が増え、癒合し、1本1本のB-lineとして観察できないようになる。このように全体にわたり白く見える所見をWhitelungと言う。5. 胸膜から発生し進行した肺炎像は、次第にconsolidationへ移行していく。胸膜に接し、胸膜直下に観察される小さなconsolidationは、subpleural consolidationといい、COVID-19肺炎の代表的な所見の一つでもある。(How to perform lung ultrasound in pregnant women with suspected COVID-19 infectionより改変引用)

また、COVID-19肺炎には2つのphenotypeがあると言われている。コンプライアンス(肺の膨らみやすさ)が保たれており、すりガラス影が主体のType Lといわれる。それと、いわゆるARDSのように、背側に大きな無気肺を生じコンプ

ライアンスが低下した肺がType Hである。これらは、適切な酸素療法、人工呼吸器管理の仕方が異なるため、区別する必要がある。CT検査が非常に有用であるが、COVID-19診療においてはCT検査へのアクセスが容易でないことに加え病態が急速に悪化することも多く施行出来ないことも少なくない。前述の通りLUSではCOVID-19肺炎の病勢の把握やTypeL/Hの区別が可能である。コロナ禍においてLUSの注目度は上がり、10年分の成長をしたと言っても過言ではない。LUSを有用に活用されたい。

<心原性肺水腫とARDSの鑑別>

心原性肺水腫では、静脈圧上昇により血管外に漏れた水を、ARDSでは炎症や肺障害により血管外に漏れた水をエコーの所見として拾う。時に、レントゲンやCTでも鑑別困難なこれらを、エコーの所見で鑑別することが出来る(図23)。

	急性心原性肺水腫	ARDS
臨床経過	急性	急性
B-line	常にあり	常にあり
B-lineの分布	両性/対称	びまん性/非対称
Pleural lineの異常	なし	あり
Sliding signの減衰/消失	なし	あり
Lung pulse	なし	あり
Consolidation	なし	背側にあり

図23：参考文献7の図を改変

臨床経過は両方とも急性で、エコー所見の主体がB-lineであることに変わりはない。しかし、B-lineの分布は急性心原性肺水腫が両側対称性であることが多いのに対して、ARDSではびまん性で非対称であることが多い。同じB-lineでも、肺水腫においては比較的同様のB-lineが均一に見えるのに対して、ARDSの場合はびまん性であっても、胸膜面が炎症により粗雑になるため、B-lineも不均一な形、分布になるなど、注意深く観察することで、両者は鑑別することが出来る。無気肺や胸膜の炎症、癒着、強い人工呼吸器設定による健常肺の過膨張でlung slidingが減衰もしくは消失することがある。また、胸膜の異常所見に注目することで区別することもできる。炎症が強いARDSでは、胸膜の異常所見が観察される。Thickening(>2mm)、small subpleural consolidation、coarse appearance、spared area (図24)はほとんどのARDSで見える一方で、心原性肺水腫では見られない。

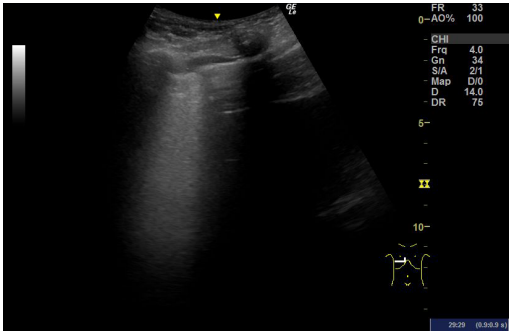


図24：Spared area

1肋間となり、もしくは同じ肋間内でも正常所見と異常所見が観察される。病変が散在性であるCOVID-19ではなおよく観察される。

<治療の効果判定>

B-lineは、胸膜から延びるアーチファクトであり、肺の含気量や肺血管外水分量(EVLW)を反映し、高い再現性があることから、うっ血性心不全に対する治療(利尿薬、PEEP)の評価の指標としても用いることができる。

また、近年急性呼吸不全の治療の選択肢として腹臥位療法が一般的となった。腹臥位療法は背側の無気肺により生じた肺の不均一を解消し、VILI(ventilator-induced lung injury)を予防することにある。腹臥位療法の反応性(治療の有効性)は、腹臥位療法施行前後のP/Fやコンプライアンスなどを用いて評価されるが、肺エコーを行うことで、背側の病変を直接評価することが出来る。図25に、腹臥位療法前後の右側胸部～背側にかけてのPLAPS pointの所見を示す。Tissue-likeに見えていた大きなconsolidationは、16時間後にはirregular pleural lineとB-lineに置き換わり、含気量が増えたことが分かる。LUSは、診断のみならず、治療効果を評価する上でも有効である。

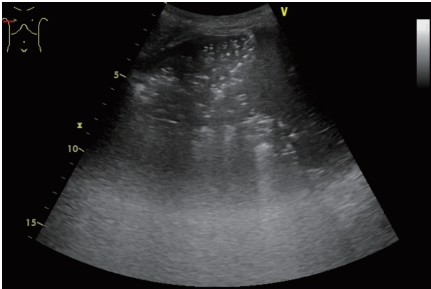


図25：腹臥位療法施行前 Tissue-like Sign

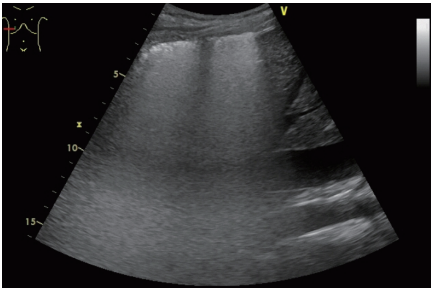


図25：16時間の腹臥位療法施行後 White lung, irregular pleural line

<客観的評価とPitfalls>

エコーの欠点として術者のばらつきがあることが指摘される。そのため適切な病勢を評価するためにはその所見を定量化することが重要である。特に肺エコーにおいてはB-lineの本数やその様子が病勢を表していると考えられるため、それを定量化することが重要になる。VenueではAuto B-lineというB-lineの本数や様子を定量化した機能を有している。Auto B-line機能を使うと術者が各部位で観察した結果がLung ScoreというB-lineを指標としたスコアとして、客観的に表示される。経験・技量の異なる専門医とレジデントが施行しても同様な結果を得ることが出来る(図26)。一方で、非炎症性疾患(ex 心原性肺水腫)と異なり、炎症性疾患(ARDS、COVID-19肺炎など)では、B-lineの本数だけでは病勢を適切に判断できないこともある。胸膜の所見を合わせて評価することで、炎症所見が増悪傾向の途上なのか小康状態の経過を見ているのか、評価することが出来る。

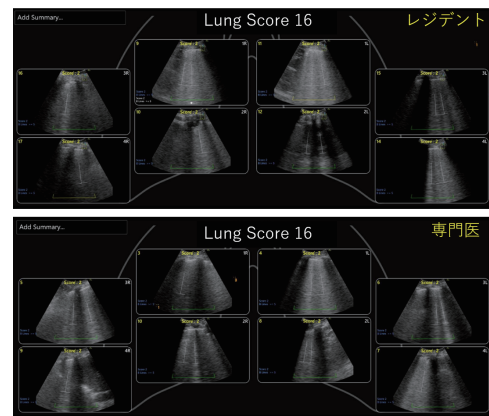
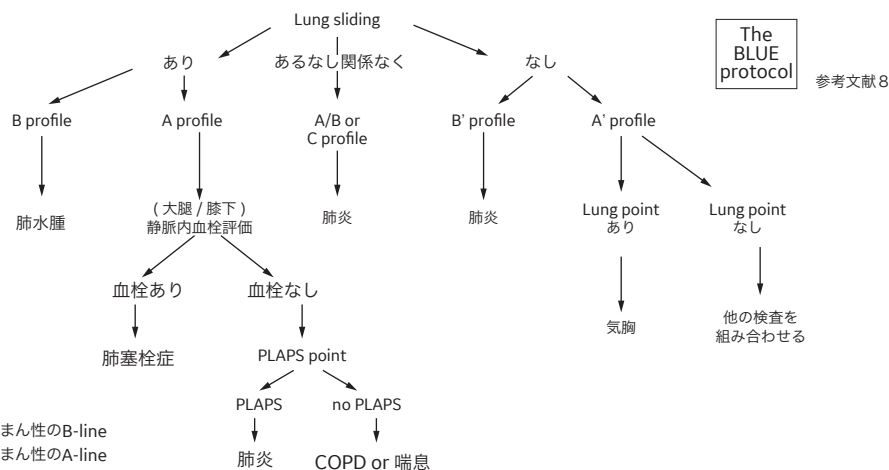


図26 : Lung Score



おわりに

肺エコーは、浸潤影、胸水、間質症候群の検出においては、胸部レントゲン写真よりも感度/特異度ともに優れていることが多い。POCUSを呼吸不全の原因検索として系統だてて行うBLUE protocol(図 BLUE protocol)は、現在救急領域を中心に、広く知られている。低侵襲・安価・迅速にできる検査として、エコーの有用性は高まっている。有効に活用することでCTと同等の診断精度を得ることが出来、リアルタイムで病勢や治療効果判定を行える点では、ERや手術室のみならず、一般病棟やICUのベッドサイドなど活躍の幅は広い。



- B Profile : Lung sliding+/両側びまん性のB-line
- A Profile : Lung sliding+/両側びまん性のA-line
- B' Profile : Lung sliding-/両側びまん性のB-line
- A' Profile : Lung sliding-/両側びまん性のA-line
- A/B Profile : 場所によりA-line、B-line両方が観察される非対称な所見
- C Profile : 前胸部にConsolidationを認める



参考文献

- 1 Francisco MJ Neto, Rahal A Junior, Vieira FA, Silva PS, Funari MB. Advances in lung ultrasound. Einstein (Sao Paulo). 2016 Jul-Sep;14(3):443-448.
- 2 Roch A, Bojan M, Michelet P, Romain F, Bregeon F, Papazian L, Auffray JP. Usefulness of ultrasonography in predicting pleural effusions > 500 mL in patients receiving mechanical ventilation. Chest. 2005 Jan;127(1):224-32.
- 3 Danish M, Agarwal A, Goyal P, Gupta D, Lal H, Prasad R, Dhiraaj S, Agarwal A, Mishra P. Diagnostic Performance of 6-Point Lung Ultrasound in ICU Patients: A Comparison with Chest X-Ray and CTThorax. Turk J Anaesthesiol Reanim. 2019 Aug;47(4):307-319.
- 4 Lichtenstein D, Mezière G, Seitz J. The dynamic air bronchogram. A lung ultrasound sign of alveolar consolidation ruling out atelectasis. Chest. 2009 Jun;135(6):1421-1425.
- 5 Lichtenstein DA, Lascols N, Prin S, Mezière G. The "lung pulse": an early ultrasound sign of complete atelectasis. Intensive Care Med. 2003 Dec;29(12):2187-2192.
- 6 Volpicelli G. Sonographic diagnosis of pneumothorax. Intensive Care Med. 2011 Feb;37(2):224-32.
- 7 Mayo PH, Copetti R, Feller-Kopman D, Mathis G, Maury E, Mongodi S, Mojoli F, Volpicelli G, Zanobetti M. Thoracic ultrasonography: a narrative review. Intensive Care Med. 2019 Sep;45(9):1200-1211.
- 8 Lichtenstein DA, Mezière GA. Relevance of lung ultrasound in the diagnosis of acute respiratory failure: the BLUE protocol. Chest. 2008 Jul;134(1):117-25.

*本資料に掲載されている内容は、お客様の使用経験に基づく記載です。弊社が保証するものではありません。

販売名称：汎用超音波画像診断装置 Venue 医療機器認証番号：229ABBZX00055000
製造販売業者名：GEヘルスケア・ジャパン株式会社

記載内容は、お断りなく変更する場合がありますのでご了承ください。

©2021 General Electric Company-All rights reserved

Printed in Japan

Rev.1.0 2021/6 1F・CK-C1(KM・KM) Bulletin D74A14 JB03639JA