総 説

肺疾患におけるレントゲンと病理の比較検討

Part 1 伸展固定肺標本の作成と解析法. 正常レントゲン解剖

伊 藤 春 海

京都大学医学部附属病院放射線部

RADIOLOGIC-PATHOLOGIC CORRELATIVE STUDIES OF DIFFUSE PULMONARY DISEASES

Part I Preparation of lung specimens and methods of analyzing them. Normal roentgen anatomy of the lung

HARUMI ITOH

Radiology and Nuclear Medicine Service, Kyoto University Hospital
(Director: Professor Mitsuyuki Abe)

Summary

Our ten years experience on radiologic-pathologic correlations of the lung specimens has proven useful for accurate interpretation of chest radiogram and CT with diffuse lung diseases. The studies are divided into four contents as follows.

- (1) Preparation of lung specimens and methods of analyzing them
- (2) Normal roentgen anatomy of the lung
- (3) Radiologic-pathologic correlation of diffuse pulmonary diseases
- (4) Interpretation of chest radiogram and CT of diffuse lung diseases based on the above studies

This article deals with the first two.

The lung obtained at autopsy was inflated and fixed with liquid fixatives. After fixation the lung was sliced and dried for stereomicroscopic and radiographic studies. Five mm thick slices were useful for reconstruct the major bronchi and vessels, while one mm thick slices were suitable for peripheral structures.

Three surfaces and margins were noted on the lung. Special attention was paid to the grooves for superior vena cava and aorta and to crista pulmonis to understand normal chest radiogram.

In the sliced lung specimens it was noted that pulmonary arteries and bronchi run together, while pulmonary veins are away from these structures. This was recognized both at segmental and lobular level.

1. はじめに

胸部X線診断の進歩を支える要因に大きく分けて二つ

ある。一つは技術的側面であり撮影機器やX線フィルムの改良などを含む。これによりX線像の画質が向上することは言うまでもない。もう一つは読影技術に直接関係

した事柄でX線像と病理像の比較検討である。この重要性は胃腸の二重造影法の確立が手術標本の詳細な比較検討によってなされたことを考えれば良く理解される。胸部においてもX線像と病理像の対比は昔から行われておりこれ自身目新しい訳ではないが、最近再び大きな関心が持たれつつある。その切っ掛けをなしたのがX線CTである。特にスライス厚5mm以下の高分解能画像は胸部X線像の欠点である像の重なりを大幅に解決し病変を観察し易くした。このCTの特徴が最大限生かされたのがびまん性肺病変である。びまん性肺病変はX線像上既存の気管支影や血管影と複雑に重なり合い見かけ上粒状、網状、線状などに見える。この言はばパターン分類でもって読影所見とせざるを得ない。しかし実際の病理像と大きく隔たっていることは診断医の誰もが感じており、びまん性肺病変のX線診断は未だ多くの解決すべき課題を残している。そこでX線CTは丁度X線像と病理像の中間にあって両者の橋渡しの役割を担うものと期待されている。この際問題となるのがやはりCT像の病理学的裏付けである。この目的に最適なのがX線学的ならびに病理学的解析が同時に可能な伸展固定肺標本である。

伸展固定肺標本は病変部と既存の肺主要構造が伸展されて見易いという特徴を有する。したがって病変と気管支、肺血管、肺小葉などの既存構造との関係が解析し易く、病変の場を知るのに役立っている。筆者は過去10年間伸展固定肺を観察してきたが、その目的を一言で要約すれば各種肺疾患における病変の場はどこかということと、その異常がX線像やCT像にどう反映するかを研究することにあった。これによりびまん性肺病変において、肺標本→X線CT→X線像のプロセスがしだいに解明されてきている。

そこでこれまでの研究成果を解説するため内容を以下のように大きく四つに分ける。

- (1) 伸展固定肺の作成と解析法
- (2) 肺の正常レントゲン解剖
- (3) 伸展固定肺に見られる代表的病変
- (4) 伸展固定肺からCT像、X線像へ

今回は最初の(1)、(2)を解説する。特に(2)はX線撮影の対象がどのような形態学的特徴を有するのかを理解する上で重要である。

2. 伸展固定肺標本の作成と解析法

2.1 肺標本の固定と乾燥ならびに造影法

剖検肺の場合病理医の協力下に肺を損傷しないよう取

り出す。この際左右の主気管支をできるだけ長く確保すると後の処理に便利である。血管系の造影をしない場合は直ちに固定液を気管支を介して肺内に注入する。注入量は病変の程度により一定しないが肺胸膜が軽く伸展するまででよい。固定液の組成はハイツマンの成書に記載通りのポリエチレングリコール400 25%、95%エチルアルコール10%、35%ホルマリン10%、水55%である。注入後固定液が逆流しないようガーゼまたはコルクで軽く栓をする。手術肺は気管支の断端が短く固定液の注入が剖検肺ほど容易でないが慣れれば可能である。固定液を注入した肺を同じ固定液を満たした大きな容器中に浮かせ、上からガーゼで覆う。病変が強く沈む場合は糸を掛けて浮かせる。肺同志が接触したり容器の壁に当たったままだと変形して固定されてしまう。一旦変形すると元に戻らず、後の解析に困難をとまう。

肺は約1週間で固定される。全体像を写真撮影後鋭利な包丁で1cm厚のスライスとする。スライス方向は冠状断(coronal)を原則とするが目的に応じて矢状断(sagittal)、水平断(transaxial)でも良い。スライスされた肺をペーパータオルに挟んで半日放置すればX線撮影が可能な状態になるまで固定液が脱去される。以上のプロセスで得られた肺標本にはグリコールが浸潤しているため適度の硬度と湿りがある。

肺動静脈や気管支動脈などの造影は必ず固定液の注入前に行う。造影剤は消化管造影用のバリウム液でよい。太い血管の描出を特に目的としない限り造影剤にゼラチンを混ぜる必要はない。造影後上述の通り経気管支的に伸展固定する。この際主気管支にカコーレを留置しておくとの送気により便利である。

固定終了後肺を架台に吊し気管支を介してエアープンプで肺を加圧する。加圧の程度は固定液が胸膜面から緩除に滴下する位でよい。肺が固定液を失うにつれ血管内のバリウムは乾固し、この状態で肺をスライスしてもバリウムは血管外に漏れない。

気管支造影は固定終了後に行う。固定前に痰は吸引しておいた方がよい。エアープンプによる乾燥後、TV透視下で各区域気管支にネラトンカテーテルを浅くウェッジし、バリウム液を量を調整しながら注入する。注入量が多すぎると肺胞像となり結果が良くない。

2.2 肺標本のX線撮影

軟X線を発生する標本撮影専用機*を研究室の暗室内に設置するのが後の処理に便利である。肺標本の厚みは

*：ハイテックス HB-50 (ハイテックス株式会社)

肺疾患におけるレントゲンと病理の比較検討 (伊藤)

5 mm 程度が全体を見るには適当である。フィルムは富士の Ix industrial (FR, 四切) を用い標本を直接または薄紙を介して置く。カセットや遮光紙でフィルムを覆う必要はない。撮影条件は焦点～フィルム距離 60 cm, 電圧 20 kV, 電流 2 mA でよい。撮影後ハイレンドールによる手現像を直ちに行う。写真の仕上げの目安として肺の辺縁が明瞭に認識されるベースの濃度を工夫することが大切である。標本の厚さが 1 mm の場合は電圧 10 kV, 2 mA, 焦点～フィルム距離 40 cm とする。フィルムは上述と同じでよい。ただベースの濃度は 5 mm 厚の標本の場合により抑え気味に 1.6~1.8 程度がよい。この場合現像ムラが目立つのでフィルムは現像中絶えず動かしておく必要がある。水洗は充分行う。後で変色するとその写真はまず使えない。

造影標本のステレオ撮影は極めて有用である。5 mm 厚の標本の場合フィルム移動距離を 15 cm 程度とし 2 枚の写真を得る。これを 3 倍と 6 倍の接眼レンズを装着したステレオ鏡**で観察する。歪みのない拡大実体像が得

られる。1 mm 厚の標本の場合はフィルム移動距離を 20 cm とする。

1 mm 厚のスライス標本は専用のマイクロスライサー***で得る。これにより 7 cm 四方の大きさで一定厚の切片が連続的に得られる。

2.3 実体顕微鏡による観察

上述の X 線像は実体顕微鏡****による標本表面の観察と組み合わせられて始めて有効となる。肺胞や末梢気道が伸展されているため病変部とのコントラストが極めて良い。拡大すれば肺胞の個々が観察される。肺のいわゆる“含気”について具体的イメージを得るには実体顕微鏡による観察が最も良い。

3. 肺の正常レントゲン解剖

3.1 肺の外形

肺は上下に長く肺尖の上端は鎖骨の上方 2~3 cm に達する。葉間溝によって右肺は上, 中, 下葉の 3 葉に、左肺は上, 下葉の 2 葉に分けられる。葉間溝は肺の肋骨

Fig. 1-a 伸展固定された右肺の肋骨面。上, 中葉に炭粉沈着が著しい。S⁶を他の肺底区から分ける副裂を認める。葉間面では2枚の肺胸膜が接する。

Fig. 1-b 同標本の裏側。肺門がある内側面、横隔膜に接する横膈面、そして肋骨面の一部が見える。奇静脈弓の上下に crista pulmonis を認める。前縁と下縁は鋭いが後縁は鈍い。上中葉の分離は不完全である。

**：拡大実体鏡 (ニコン)

***：マイクロスライサー DTK3000W (堂坂)

****：フォトマクロスコープ M-400 (ウイルド)

Fig. 2-a 左肺の肋骨面。上葉下部の舌区が深い心切痕を形成する。

Fig. 2-b 同標本の裏側。肺門後方を大動脈溝が縦走する。肺胸膜直下の血管は肺静脈である。上葉下部は心圧痕により薄い。

面で明瞭であるが内側面まで到達しない不全分葉がしばしばある。Fig. 1-b は上中葉の不全分葉例である。この場合葉間に相当して発達した肺静脈を認めることは良く知られている。肺は外形から 3 面 3 縁が区別される。前縁は肺尖の基部近く第 1 肋骨圧痕の前方に始まり S³ を通って S⁵ の下端に終る。これを境に肋骨面は鋭く内側面に移行する。左右の肺の前縁が互いに接すると 4 層の胸膜（両側の縦隔胸膜と肺胸膜）からなる前接合線（anterior junction line）が正面 X 線像で見られる。肋骨面が横膈面に移行する部分が下縁で前縁同様に鋭い。下縁は外側と後方で低く胸膜腔の下端の形状に適合している。下縁は胸水貯溜の最初の所見が現われる部位として重要である。横膈面の大半は下葉が占めるが前方の 1 部が中葉や舌区のこと多い。後縁は肋骨角に接する鈍い部分で肋骨面の 1 部である。内側面には気管支と肺動静脈が出入する肺門がある。縦隔を覆う胸膜は肺門で肺胸膜に移行する。この移行部は肺門から下方にも細く伸び縦隔と肺下葉を結ぶ（下肺靱帯と呼ばれる）。右肺の内側面には上、中葉に渡って肺門の前を縦走する上大静脈溝が認められる。その上方は外側に緩やかにカーブして右腕頭静

脈溝となり肺尖の基部で前に出る。上大静脈溝の直ぐ後方の肺は気管の右壁に近接し正面像で傍気管線（paratracheal line）を形成する。この線は気管壁とその周囲の縦隔軟部組織からなる。左肺内側面には鎖骨下動脈溝と大動脈溝があり、両者は肺門上方でつながる。大動脈溝は上葉と下葉に跨がり、上葉では肺門上部から後方へ緩やかなカーブを描いて大葉間溝に終る。一方下葉では肺門後方を葉間溝から肺底まで縦走する。左肺上葉は心圧痕のためその前縁が薄く、舌区は右中葉と異なり前胸壁に接しない（心切痕）。

上大静脈や大動脈が X 線像で見える条件としてそれら血管と肺の接触（縦隔組織を介して）が深く、そしてその面ができるだけ入射 X 線束と平行であることが挙げられる。上大静脈の上端近くから右腕頭静脈にかけて肺の接触は前縁の終了とともに浅くなりしかも接触面が外方を向く。このため上大静脈の上端や右腕頭静脈は正面像で見難くなる。同じ理由で傍気管線も上部では見難い。大動脈の外側縁は正面像でよく見えるが、側面像では下方ほど見難い。これはその領域で肺との接触が浅いのみならず接触面が X 線束と平行でないからである。

Fig. 3 右肺上葉の連続した横断スライスの1部。矢印は腕頭静脈溝がしだいに深い上大静脈溝に移行する様子を示す。
crista pulmonisは上方ではS¹の領域であるが下方ではS⁶支配域となる。

Fig. 4-a 胸部正面像(FCR)。線として見えるのは傍気管線、前縦隔線、後縦隔線である。一方大動脈、左鎖骨下動脈、上大静脈は肺との境界が識別される。右肺の下縁(矢頭)やcrista pulmonisの深奥部(矢印)の位置に注意。

Fig. 4-b 左側面像。気管後壁線 (posterior tracheal stripe) や中間気管支幹後壁が見えるのは背後から接する右肺のcrista pulmonisと気道内の空気存在による。

a

b

c

d

e

f

Fig. 5 正常 CT 像. 三つのレベルの CT 像を示す. 上より奇静脈弓の上方, 奇静脈弓部, 下肺である. a, c, e は Fig. 1-b で示したレベルにほぼ相当する, c, e では前縁が発達して前接合線を形成するが a では両肺内側面が外側へ開いていることに注意. したがって上大静脈は肺に深く陷入するが (c), 腕頭静脈と肺の接触は浅い (a). 大動脈の弓部は肺と深く接するが (d), 下肺での接触は浅い (f).

Fig. 6 肺標本の割面 (右上葉). 気管支・肺動脈系の両側に肺静脈が位置する。表面の無数の小さな穴は肺胞道である。

右肺の内側面が肺門と下肺靱帯の後方で肋骨面に移行する部分が縦に低く隆起するのが見られる。この隆起は上葉から下肺に及ぶ。上葉では S^1 の娘枝領域、下葉では S^6 , S^7 , S^{10} の一部がこれに当たるが、奇静脈が上大静脈に注ぐ弓頭部で途切れる。これらの肺は奇静脈上区陥凹 (supraazygos recess) と奇静脈食道陥凹 (azygoesophageal recess) と呼ばれる縦隔の陥凹部に入り込み、*crista pulmonis* と称される。この肺が上方より順に気管、上葉気管支、中幹気管支、下肺静脈などに背後で接しX線学的コントラストを与える。左肺内側面でも右ほどではないが同様の隆起が大動脈弓を挟んで上下葉に見られる。上葉では鎖骨下動脈の後方にあり、下葉では大動脈溝と肺門～下肺靱帯の間に存在する。これらが食道の後で縦隔に深く入り込めば先の奇静脈上区陥凹と奇静脈食道陥凹に接し後縦隔線 (posterior junction line) を生じる。以上の説明でわかるように後縦隔線は奇静脈弓頭と大動脈弓の高さで途切れ左右に分かれる。

3.2 肺の内部構造

(i) 気管支と肺動静脈の配列

伸展固定された肺の割面は非伸展固定肺に比べて末梢肺組織の占める割合が大きく実際に近い。末梢肺組織は肉眼レベルでは径 1 mm 以下の無数の小さな穴とその壁からなり押えると弾力がある。肺標本を割面で見える印象は「まづ末梢肺組織があって、そこを気管支と肺血管が枝を出しつつ横切る」と言う感じであり、この方が断層像や CT 像に近い。それに反し気管支系の分岐の先端に末梢肺組織が位置するという理解は概念的には正しいが、これでは気管支や肺血管の直ぐ側に末梢肺組織が存

在する事実を受け入れるのに時間がかかる。

気管支と肺動脈は原則として併走する。ただ上行動脈のように肺門では対応する B^2 の垂区域支と離れていることもある。しかしこのような場合も末梢に到れば併走する。一方肺静脈は気管支・肺動脈系と離れてその両側で末梢肺組織を挟んで走行する。ただし葉間や縦隔近く

Fig. 7-a 肺標本のX線像。気管支・肺動脈系と肺静脈の交互配列が見られる。標本厚 = 5 mm.

Fig. 7-b 同じ標本のトレース図。青：肺静脈，赤：肺動脈。肺静脈は区域，亜区域の境界を走行する。

では1対の気管支・肺動脈系の下位で肺胸膜の直下を走行する。以上より断層像やCT像で肺動脈が交互に配列することが理解されるが、この様子は肺区域の重なりが少ない矢状断(側面断層に相当)でわかり易い。

肺静脈の内太くてV¹, V²のように名前を付されているのは各肺区域, 亜区域の境界を走行する。他方気管支と肺動脈の主軸枝は各区域の頂点となる肺門を除いて区域のほぼ中央に位置する。肺癌で肺静脈の同定を重視するのはその偏位から区域の広がり異常が診断できるからである。

(ii) 気管支から細気管支, 肺胞へ

気管支は同大2分岐を原則とした主軸系と同大分岐の間から分岐する娘枝系とからなる。これら二つの分岐形式を組み合わせると肺内部から胸膜下まで細気管支やその末梢部が形成される。したがって区域支から終末細気管支までの分岐数は胸膜側で大であり肺内部で小さい。肺門から気管支に沿って分岐を進ると最初の娘枝(以下娘枝*)が各肺区域とも主にIV~V次気管支(葉気管支=1次)から分岐する。その分岐角は親枝の同大分岐に比べて鈍く、直径は親の約半分である。この娘枝*の末梢も主軸枝と娘枝の相方から構成される。娘枝*の支配域は外側は中間層、内側は区域支の分岐角部に及ぶ、したがって気管支鏡で観察される区域支や亜区域支の外に分布する肺泡領域はそれらより1~2次末梢の気管支から分岐する娘枝*の支配域であることを理解する必要がある。気管の後で奇静脈上区陥凹に入り込む肺(Crista pulmonis)はやはりB¹の末梢枝が縦隔側へ出す娘枝*の支配下にある。

Fig. 8 肺標本のX線像。B³末梢, IIIないしIV次気管支より娘枝が分岐する。標本厚=5 mm.

終末細気管支までの気道は空気の伝導路であるがそれ以遠の呼吸細気管支, 肺泡道にはガス交換を役目とする肺胞が付着する。先に触れた肺の断面で見られる無数の穴は短軸ないし斜め方向に切れた肺泡道の断面に相当する。これに比べると細気管支や気管支が肺内で占める面積は小さい。肺泡道はその全周が蜂巢状に配列した肺胞

Fig. 9 肺標本の気管支造影像。造影剤が気腔を充盈すると肺泡像となる(矢印)。標本厚=5 mm.

Fig. 10 肺胞道と肺胞の実体顕微鏡像。

で囲まれる。この肺胞道と肺胞に含まれる含気の部分を気腔 (air space) と言う。気腔に肺炎や肺水腫の際炎症細胞や浸出液が充満し肺は硬くなる。これがX線像上浸潤影を生ずる。他方気腔を分ける壁(肺胞壁に相当する)が肺間質に当たり、この薄い部分がびまん性に肥厚する疾患の代表例が間質性肺炎である。気腔の大きさは生体の場合最大吸気位で最も大である。その容積 (全肺気量

と呼ばれる) は左右肺合わせて正常で5~6リットルにも及ぶ。最大吸気位から最大呼気位まで呼出しても肺内には含気が残される。このときの肺容量を残気量と言い左右合わせて約1~1.5リットルである。全肺気量と残気量の差が肺活量である。

鼻腔から気管、気管支を経て非呼吸細気管支までの含気部分を解剖学的死腔と呼びその容量は両肺で約150 ml

Fig. 11 肺動脈造影標本のステレオX線像。標本厚 = 5 mm.

肺疾患におけるレントゲンと病理の比較検討 (伊藤)

であり先の気腔容積に比して著しく小さい。すなわちX線像で見られる含気はほとんどが気腔由来である。

(iii) 肺動脈から肺泡毛細血管, 肺静脈へ

生理学的検討によると肺の血液量は両肺で約500 mlであり, その内肺泡毛細血管内に約100 ml, 残りを肺動静脈で分ける。肺動脈, 肺泡毛細血管, 肺静脈の内最も広い血管床を有するのが肺泡毛細血管で全表面積は70~80 m²と計算されている。肺泡毛細血管は肺泡隔壁内で8~10 μmの直径を有し互いに吻合しつつ濃密な血管網を形成する。バリウム液による造影標本のX線像で肺泡毛細血管の存在は均等で淡い濃度上昇から推測されるが, 個々の毛細血管の描出は顕微X線撮影によらねばならな

い。肺は上下に長い臓器であり, しかも肺動脈圧は体循環系ほど高くない。そのため肺血流は重力の影響を受け立位では下肺の血管が伸展し太くなる。仰臥位でも同様の重力効果が背側で見られる。

肺泡毛細血管は細静脈を経て小葉間の肺静脈につながる。小葉内で肺動脈は肺泡道の間を走行し小葉の端で細くなる。他方小葉内の細静脈は小葉の端に近づくにつれ太くなる。以上のような末梢レベルでも肺区域レベルと同様動静脈の交互配列が見られる。動静脈の区別の重要性は次々回でCT像を解説する際に詳しく述べる。

肺静脈は肺循環系の一員であるが, 気管支動脈循環とも交通している。大動脈から分岐した気管支動脈は中樞

Fig. 12 Fig. 11 よりさらに末梢部が造影されている。小葉間隔壁中の肺静脈は造影されていない。標本厚 = 5 mm.

Fig. 13 前図の標本を実体顕微鏡で観察したもの。肺泡道に付着する肺泡の毛細血管がバリウムで満たされている。

Fig. 14 肺動静脈の造影X線像。小葉レベルで両血管系の交互配列が見られる。標本厚 = 1 mm.

気道や縦隔に枝を出した後気管支に沿って肺内に入る。肺内では気管支壁と周囲結合組織内で毛細血管網とそれに続く気管支静脈叢を形成する。気管支静脈叢は薄い血管壁と径の不同に特徴があり、これが細い肺静脈と交通する。この交通を介して気管支壁を栄養した血液は左房へ還流する。以上のように肺静脈は左心系の上流にあって肺循環と気管支循環の両方と深く結びついている。したがって左房圧が上昇する心疾患では肺静脈を介して両方の循環系に影響を及ぼす。

文 献

- 1) 曾根脩輔：単純X線診断，呼吸器疾患の西像診断(曾根脩輔編著)，pp. 2～54，南江堂，東京，(1984)。
- 2) Fraser RG, and Paré JAP: The Pulmonary Vascular system. Diagnosis of Diseases of the Chest (vol. 1), pp. 83～113, Saunders, Philadelphia, (1977)。
- 3) Heitzman ER: The Mediastinum. Radiologic Correlations with Anatomy and Pathology, Mosby, St. Louise, (1977)。
- 4) Heitzman ER: Preparation of inflated lung specimens. The Lung. Radiologic-Pathologic Correlations, pp. 4～12, Mosby, St. Louise, (1984)。
- 5) 森於菟，平澤興，小川鼎三，森優，岡本道雄，大内弘，森富，細川宏：呼吸器。解剖学(vol. 3)，pp. 162～194，金原出版，東京，(1964)。

Fig. 15 気管支動脈造影標本のX線像。B³C, A³Cを養った血液は肺静脈(V¹の娘枝)に流入する。標本厚 = 5 mm.