

X線走査キモグラフィーによる肺機能の研究

昭和38年10月10日 受付

信州大学医学部戸塚内科学教室

(指導：戸塚忠政教授)

溝 上 長 男

Study of Pulmonary Function by X-Ray Scanning Kymography

Osao Mizoue

The 1st Clinic of Internal Medicine, Faculty of Medicine, Shinshu University
(Director: Prof. Tadamasasa Tozuka)

緒 言

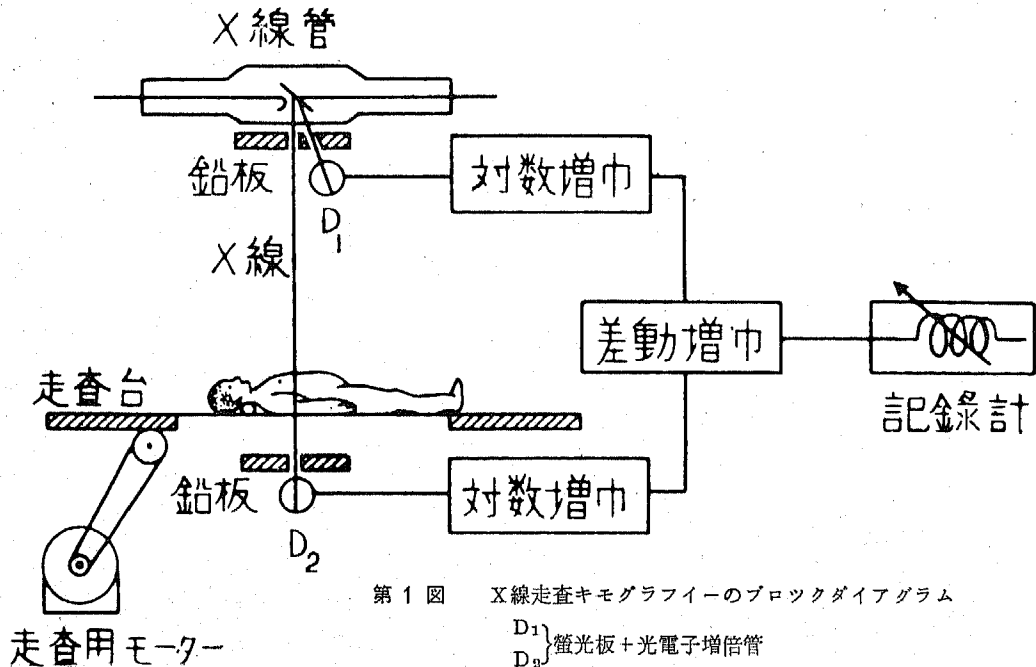
肺の呼吸並びに縮張機能の検査法は、肺生理学の高度の進歩とともに最近著しい発展をしてきており、X線学的分野においても種々の方法が試みられている。これらの方法は肺及び呼吸補助器官の形態の変化と、動態の変化を調べて肺の機能を推定するものに大別される。前者に属するものとして、種々の呼吸位で或は種々の方向より撮影したX線写真の読影があり、後者にはX線映画、X線動態撮影法、レントゲンキモグラム等が属する。その他に胸部を透過したX線量の呼吸に伴う変動より肺の呼吸様相を分析しようとして、X線フィルムの黒化度を測定する方法がある。更

に最近、蛍光板上の光の濃淡の変動を光電管を用いて電気的变化に変えて記録する方法^{①②③}、或はブラウン管に映像させる方法が、局所肺機能検査に応用されて注目を浴びている。しかしこれ等の方法による肺機能検査は、いずれも相対的な比較にとどまり、定量測定という点で、やゝ難点がある。著者はこれ等の方法による欠陥を是正し、定量的測定も可能であるX線走査キモグラフィー^{④⑤⑥}を肺機能検査、特に局所肺機能検査に利用して種々の興味ある知見を得た。

測定装置とその性能

1. X線走査キモグラフィーの構造

装置の構造の概要は第1図のブロックダイアグラム



に示す如くである。即ち入射X線と透過X線の蛍光板上に投影された肺野の明るさを、それぞれ光電子増倍管、対数増巾器を通して電気的变化に変えて増巾し、更に差動増巾器をもつて両者の対数差 ($\log \frac{I_0}{I} : I_0 =$ 入射X線量, $I =$ 透過X線量) を記録するものである。X線ビームは、 $1 \times 10 \text{mm}^2$ の鉛製スリットを通して、一定の速度で駆動されているベット上の被検者に当てられるようになっている。

2. 装置の特長

a. 本装置は入射X線量と透過X線量の対数差 ($\log I_0 - \log I$)、即ち、両者の線量比の対数 ($\log \frac{I_0}{I}$) を求めているので、X線出力の変動による影響が除去されている。X線出力が増減しても透過線量も同じ割合で増減するので、その比は変わらないからである。

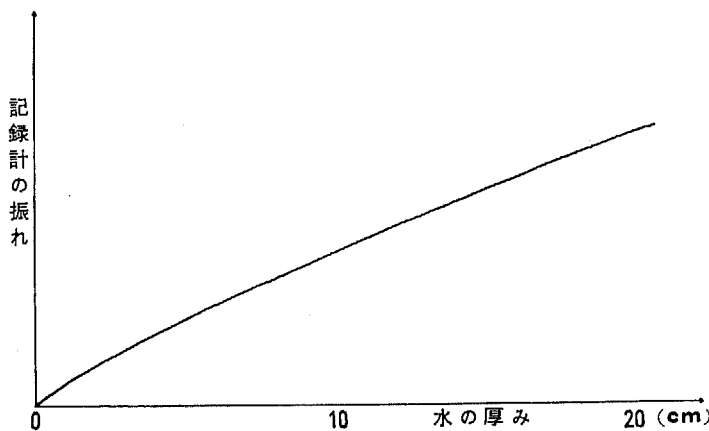
b. X線の減弱が指数曲線 $e^{-\mu x}$ ($x =$ 透過した物質の厚み, $\mu =$ X線減弱係数) で表わされるので、入射X線量と透過X線量の対数差 ($\log \frac{I_0}{I}$) は次式に示す如くX線の透過した物質の厚み, x と直線関係になり、物質の厚みを求めることができる。

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\log I = \log I_0 - \mu x$$

$$\log \frac{I_0}{I} = \mu x$$

管電圧管 180KVp, 管電流 5mA, フィルター (Cu 0.5mm + Al 0.5mm) の条件で水ファントムの厚みを変化させた場合、本装置ではファントムの厚みと、記録紙上の針の振れとは第2図に示す如く略々直線関係になっている。



第2図 X線を透過した水の厚みと記録計の振れが直線関係をなしている

管電圧 180 KVp
 管電流 5 mA
 フィルター (Cu 0.5mm + Al 0.5mm)

c. $1 \times 10 \text{mm}^2$ の細いX線ビームで測定するので極めて狭い範囲の厚みが測れる。従つて極めて微細な構造まで描記することができる。

X線ビームが細いので1回の検査で受ける被曝線量は50mr以下で極めて少く、しかも10mm巾の部分が被曝するのみであるから生体全体に及ぼす影響は殆んどない。

d. 本装置は、ベットを一定の速度で駆動させることにより、被検者を連続走査し記録できるので、走査各部位の組織の動的状態を把握することができる。

e. 管電圧 180KVp の起高圧X線を使用しているので、軟部組織と骨組織におけるX線透過率が比較的均等となつている。

検査方法

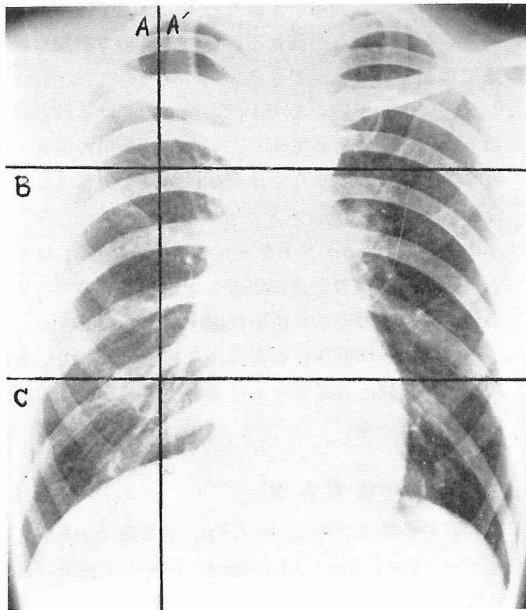
装置の条件は管電圧 180KVp, 管電流 5mA, フィルター (Cu 0.5mm + Al 0.5mm), スリット面積 $1 \times 10 \text{mm}^2$, ベット速度 10cm/min, 記録速度 10cm/min とし、ゲインは水10cmの厚みを透過するX線の $\log \frac{I_0}{I}$ が、記録紙上10cmの指度を示すように調節して記録を行つた (X線透過率は軟部組織と水と殆んど等価であるので、記録紙上の指度はX線透過部位全層の組織の厚みを表わすことになる)。被検者は仰臥位として、安静呼吸或は深呼吸を行わせて任意の胸部を走査記録した。

成績

1. 健康人

第3図は32才、男、健康人の胸部レ線写真と走査部位を示し、第4図は右鎖骨中線を安静呼吸時と深呼吸時に craniocaudal の方向へ走査したX線走査キモグラムである。

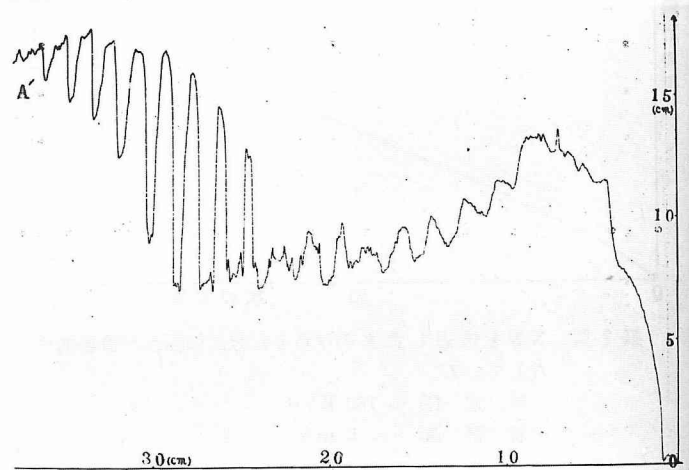
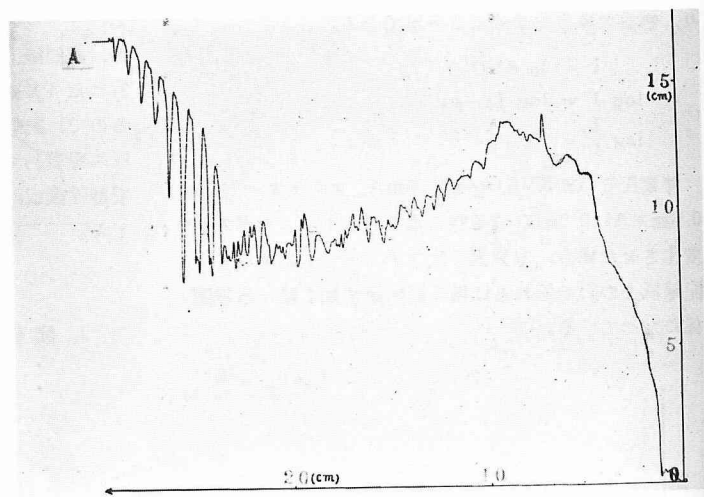
X線ビームが被検者に入るに従つて、基線よりの高さが次第に高くなり、肩筋群及び鎖骨の部位で最高となり、上肺野から中肺野に入るとつれて呼気時に高く、吸気時に低い波形 (以下呼吸波と省略する) を描きながら次第に低くなり、下肺野から横隔膜及び肝の部位で再び高くなつている。この部位で呼気時に高く、吸気時に低い振巾の大きな波形 (以下肝、横隔膜部呼吸波と省略する) がみられるのは、横隔膜及び肝が呼気時に胸廓内へ、吸気時に腹



第3図 胸部 X 線写真

健康人, 32才, 男

黒線 (A, A', B, C) は走査部位を示す

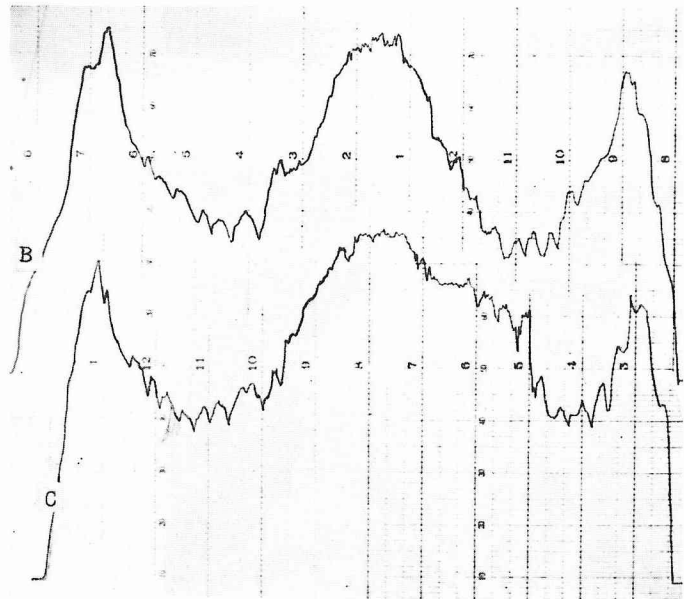


第4図 X線走査キモグラム

健康人, 32才, 男

A : 安静呼吸時

A' : 深呼吸時



第5図 X線走査キモグラム
健康人, 32才, 男
深呼吸時に胸部を左右に走査し
たもの

部の方へ移動しているためである。安静呼吸時と深呼吸時の曲線を比較すると、呼吸波の振幅は安静呼吸時で小さく、深呼吸時で大きくなり、著明な差が認められる。また肝、横隔膜部呼吸波のみられる部位の面積も安静呼吸時で小さく、深呼吸時で大きくなり著明な差が認められる。

第5図は同一の健康人の胸部を、左右に走査して得た深呼吸時のキモグラムである。走査部位は第3図に示してある。

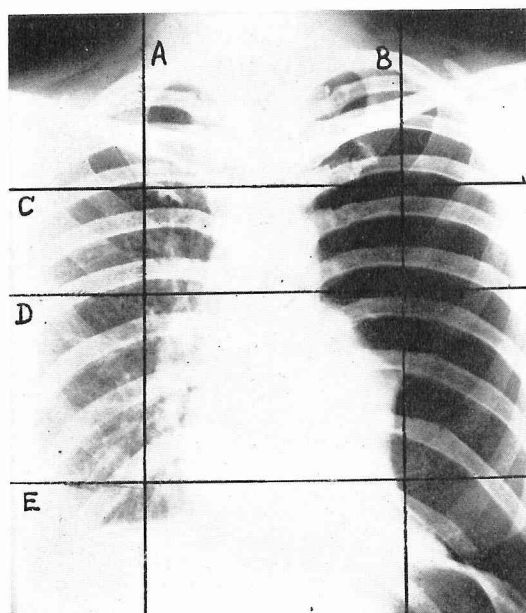
曲線は、X線ビームが被検者に入ると基線より急激に上昇し、肺野に入ると呼吸波を画きながら下降し右肺中央で最低となり、縦隔洞及び脊椎に相当する部位で再び上昇し、呼吸波を欠き最高となる。X線ビームが左肺に入るにつれて、呼吸波が現われ、曲線の高さは低くなり左肺中央で最低となる。それから曲線は再び上昇して急激に低下し基線に戻る。呼吸波は、左右肺ともに肺組織の多い中央部で最も大きくなっている。X線ビームが胸部に入る時と出る時に急激に曲線が上昇するのは、胸壁組織を切線方向にX線が透過するため、X線を吸収する軟部組織の厚みが厚くなっているためである。曲線Cにおいて中央の脊椎及び縦隔洞に相当する部より、左肺に入る所で曲線が高く走るのは、心臓の部に相当する。

2. 自然気胸

第6図は37才、女、左自然気胸の胸部X線写真と走査部位を示し、第7図は左右鎖骨中線を安静呼吸時に craniocaudal の方向に走査したキモグラムである。

患側の曲線(B)は健側(A)に比し、基線に近く走り呼吸波が認められなくて、肺組織の欠除しているのを示している。また患側曲線の基線に低い部分で、峰の平坦になつている4箇の波は肋骨によるものである。曲線Aは健康人安静呼吸時の曲線(第4図A)と比較すると、呼吸波の振幅が大きく、かつ周期が短かく、健側肺での代償性過換気の状態が推定できる。第8図は同症例の胸部を左右の方向に走査したキモグラムである。患側胸部における曲線は呼吸波を欠き単調であり、基線からの高さも健側に比較すると、明らかに低下している。患側と健側における曲線の基線からの高さの差は、健側肺の組織の厚み(血液を含む)を表わしている。健側における曲線より、第7図Aと同様に健側肺での代償性過換気の状態を推定できる。第8図Eの曲線で、健側において振幅の大きな波がみられるが、これは横隔膜、肝部の呼吸波である。

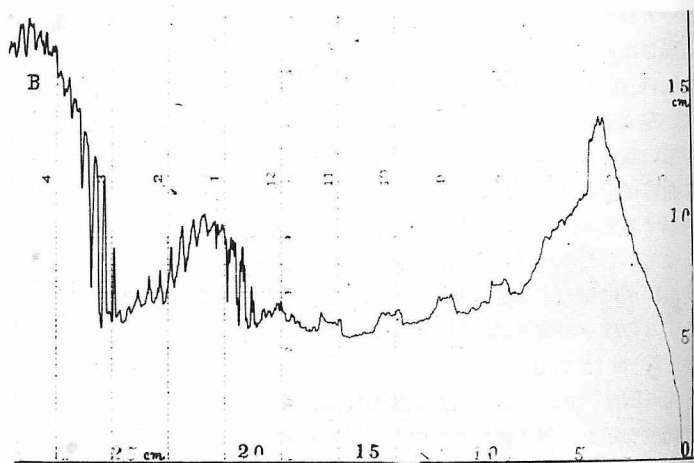
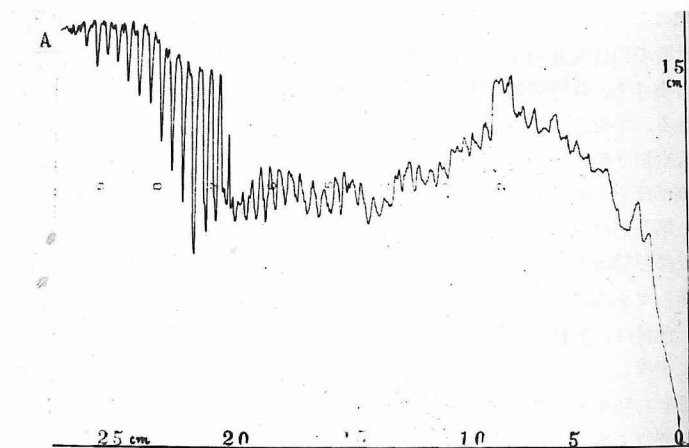
本症例は、外科的治療により患側肺の再膨脹をさせることができ、第9図は治療後の胸部X線写真と走査部位を示す。第10図は左右鎖骨中線を craniocaudal の方向に走査し、第11図は胸部を左右に走査したキモグラムである。健側曲線の呼吸波の振幅は小さくなり代償性過換気の状態は改善し、患側曲線にも呼吸波が認められている。しかし、患側曲線における呼吸波は不規則であり、患側肺の換気が未だ不均一であることを推定させる。また右肺と左肺を走査した曲線の基線からの高さが左肺が高く、患側肺の含気量の低下を示し、肋膜肺底或は手術後の癆痕の存在を推定させる。



第6図 胸部X線写真

左自然気胸, 37才, 女,

黒線(A, B, C, D, E)は走査部位を示す



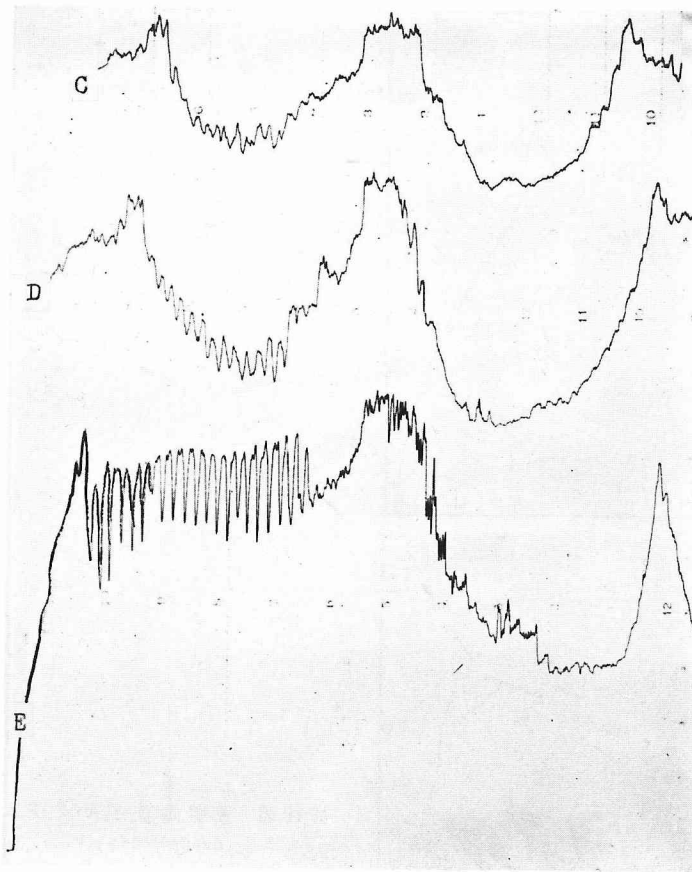
第7図 X線走査キモグラム

左自然気胸, 37才, 女

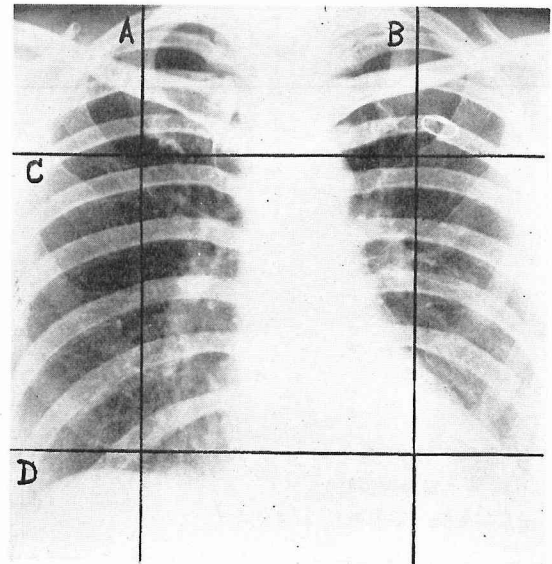
安静呼吸時

A: 健側

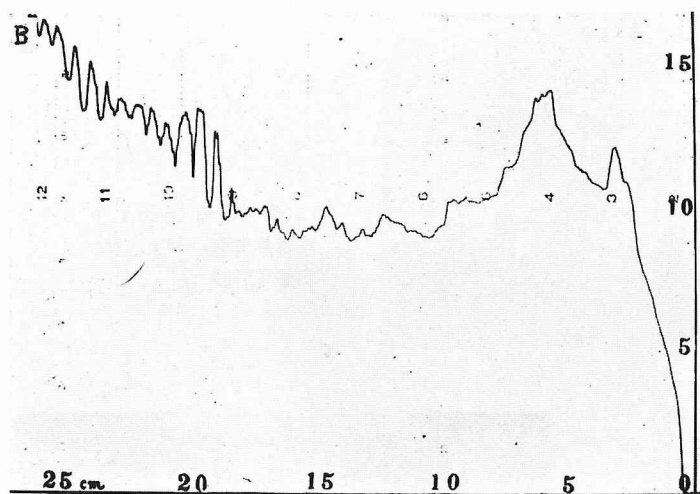
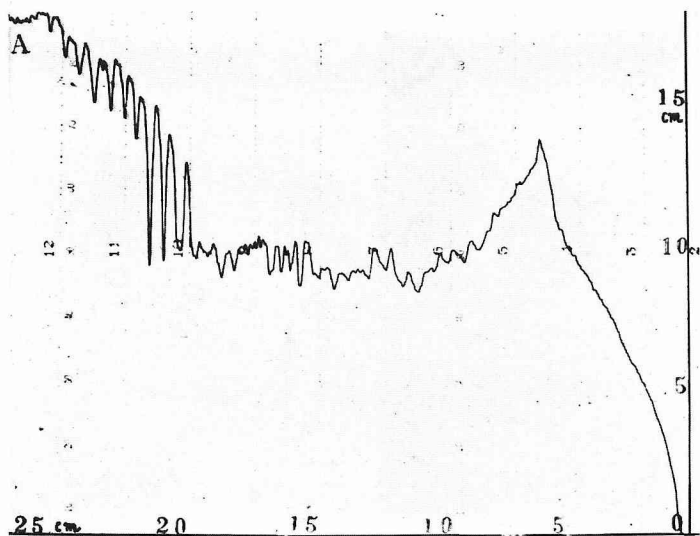
B: 患側



第8図 X線走査キモグラム
左自然気胸, 38才, 女
安静呼吸時

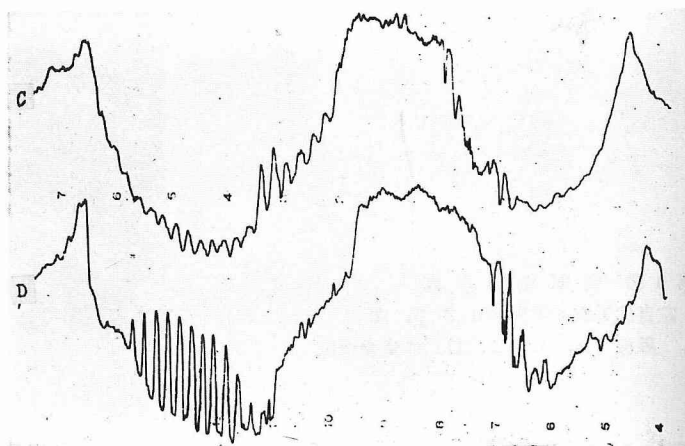


第9図 胸部X線写真
左自然気胸(手術後), 37才, 女
黒線(A, B, C, D)は走査部位



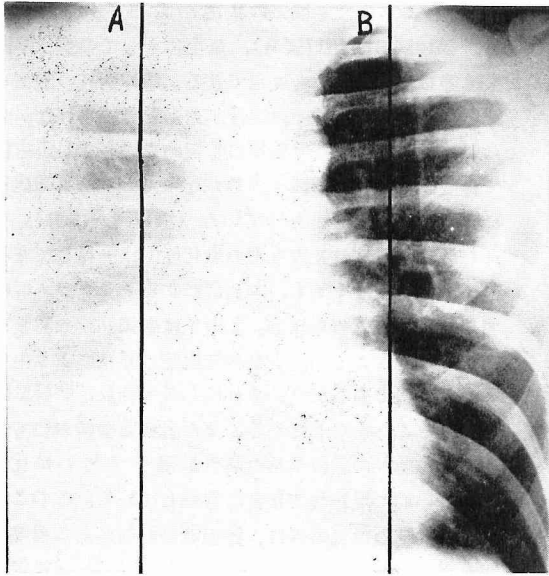
第10図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)

左自然気胸(手術後), 37才, 女
A: 健側
B: 手術側



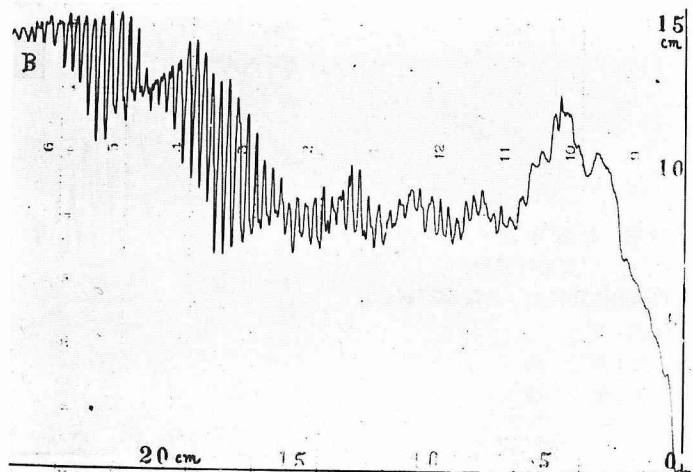
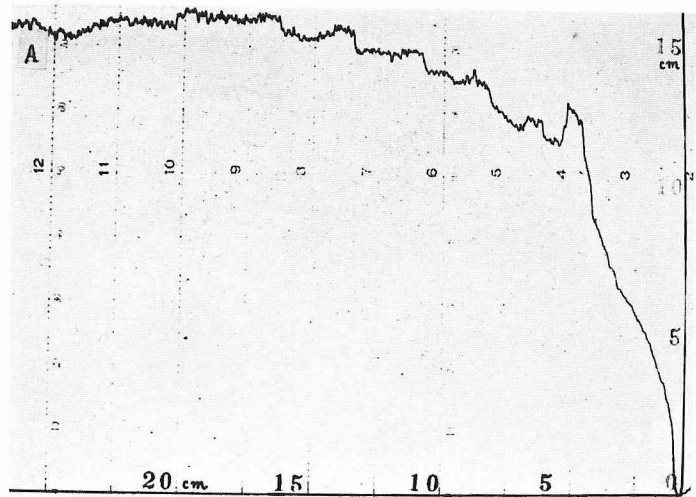
第11図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)

左自然気胸(手術後), 37才, 女



第12図 胸部 X線写真

右滲出性肋膜炎(入院第1病日), 31才, 女, 黒線(A, B)は走査部位を示す



第13図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)

右滲出性肋膜炎(入院第1病日),
31才, 女

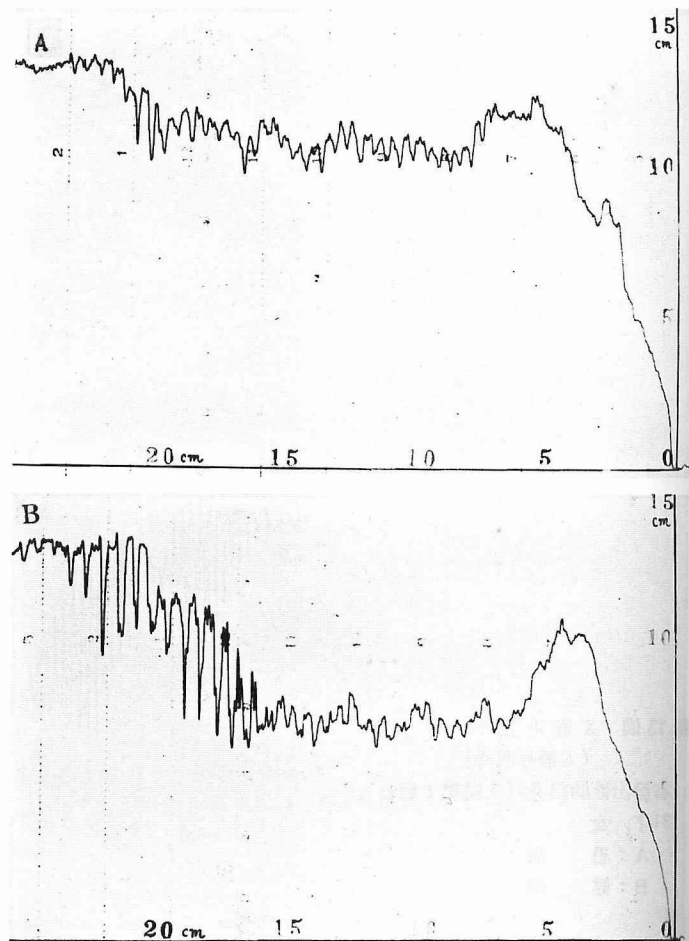
A: 患側
B: 健側

3. 滲出性肋膜炎

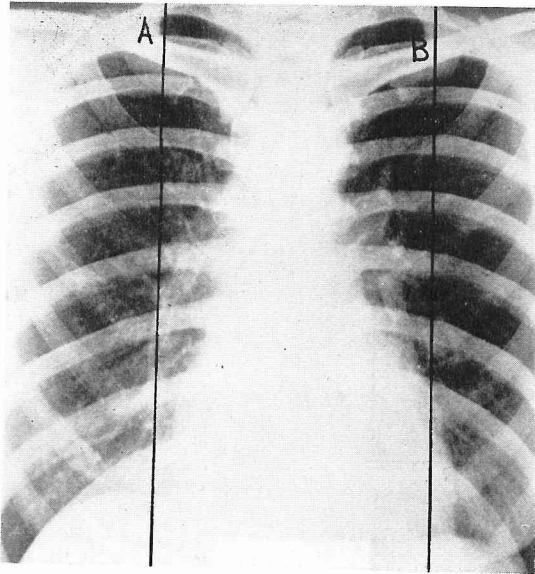
第12図から第17図までは、31才、女、右滲出性肋膜炎の経過を追って撮影及び走査した、胸部X線写真とキモグラムである。走査キモグラムは安静呼吸時に左右の鎖骨中線を craniocaudal の方向に走査し記録したものである。

入院第1病日、胸部レ線写真(第12図)に示す如く滲出液の著明に認められる時には、患側曲線(第13図A)は基線より高く走り、呼吸波が殆んど認められない。このことより患側肺の含気量の低下と換気障害の存在を推定できる。第7図Bに現われている肋骨による波が第13図Aでも認められる。健側曲線(第13図B)の呼吸波の周期は短かく、かつ振幅が大きく、健側肺での代償性過換気の状態を示している。入院病日が進むに従って滲出液の貯留量が減少して、患側曲線の基線からの高さは低くなり呼吸波が現われてくる(第14図A、第16図A、第17図A)。それと同時に健側

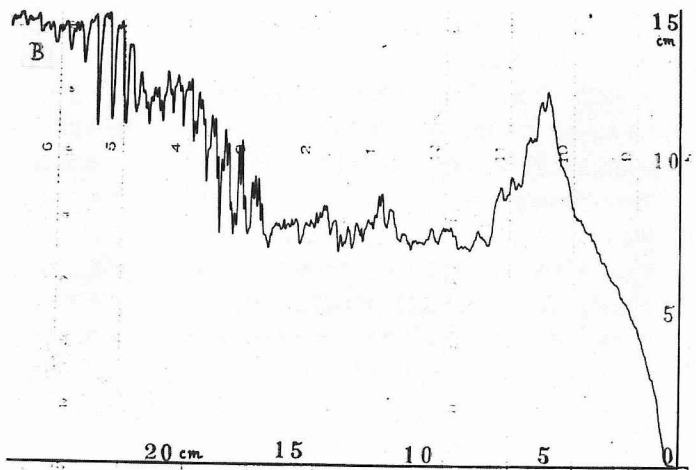
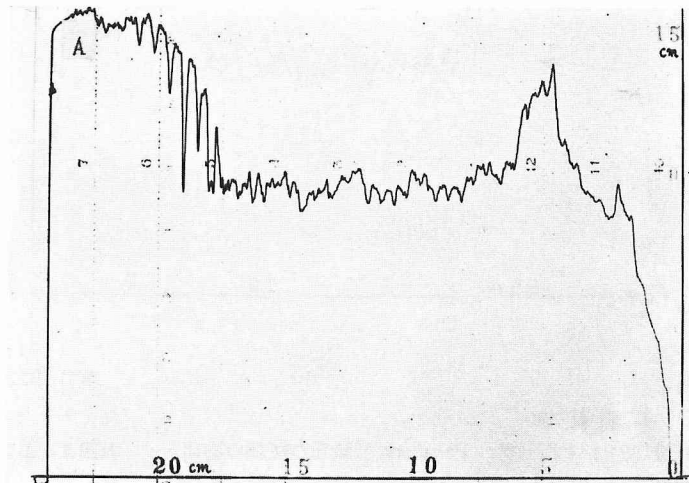
肺における代償性過換気の状態が改善され(第14図B、第16図B、第17図B)、肺全体としての換気障害も改善していることも推定できる。第42病日の胸部レ線写真(第15図)では滲出液が殆んど認められなかったが、キモグラムでは曲線の基線からの高さが、患側で軽度が高く(第16図A、B)なっており、第69病日に至り同一の高さとなっている(第17図A、B)。即ち、第42病日のX線写真の黒化度では一見して左右差が認められなくても、本装置によるキモグラムでは明らかな差が認められる。この差は患側肋膜の腫脹或は肝底形成によるか、少量の滲出液の存在により生ずるかは不明であるが、いずれにしても肺及び肋膜に異常のあることを示している。また患側曲線において呼吸波は、曲線の基線からの高さが減少するのに比較して、早期に現われて正常に復帰している。このことより患側肺の換気障害は、滲出液の貯溜がある程度存在していても、殆んど正常に復帰することが推定さ



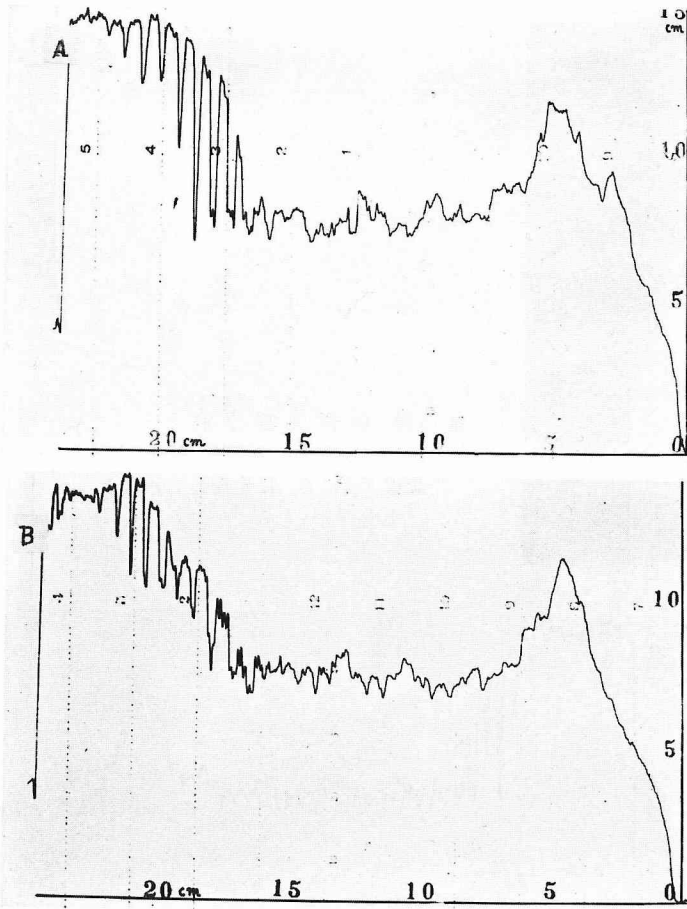
第14図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)
右滲出性肋膜炎(入院第27病日)、
31才、女
A: 患側
B: 健側



第15図 胸部 X線写真
右滲出性肋膜炎(入院第42病日), 31才, 女
黒線(A, B)は走査部位を示す



第16図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)
右滲出性肋膜炎(入院第42病日),
31才, 女
A: 患側
B: 健側



第17図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)

右滲出性肋膜炎(入院第69病日),
31才女

A: 患 側
B: 健 側

れる。

4. 肺腫瘍

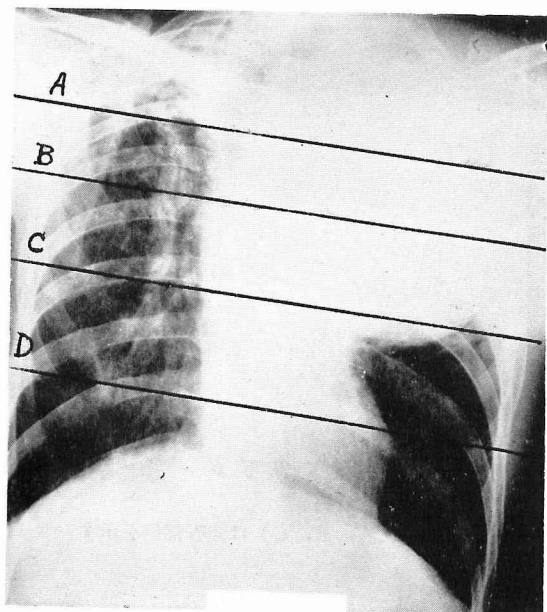
第18図は44才, 男, Pancost型肺癌の症例の胸部X線写真であり, 右上肺野に肺結核症を合併している。第19図は本症例の胸部を安静呼吸時に左右に走査したキモグラムである。

左上中肺野の腫瘍に相当する部位を走査した曲線(第19図A, B, C)は, 基線からの高さが高く, 呼吸波を殆んど欠き, この部位で肺含気量が高度に減少して高度の換気障害のあることを示している。右上肺野の肺結核症の存在する部位を走査した曲線(第19図A)では, 呼吸波が不規則であり, 換気の不均一であることを示している。右下肺野(第19図C, D), 左下肺野(第19図D)に相当する曲線の呼吸波は, 振幅が大きく週期が短かくて代償性過換気の状態を示している。

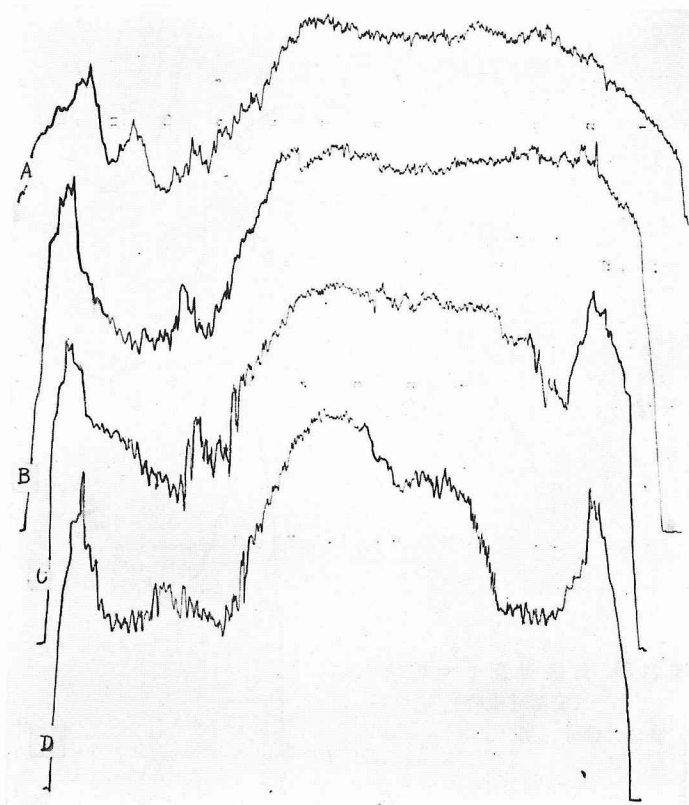
第20図は, 65才, 男, 肺癌の症例の胸部X線写真であり, 右肺門部に異常陰影を認める。

第21図は同症例の胸部を安静呼吸時に左右に走査したキモグラムである。右上中肺野に相当する曲線(第21図A, B)は, 呼吸波を欠き, 基線からの高さが左肺より低くなつており, 右肺の無換気及び過膨脹の状態, すなわち“initial emphysema”の存在していることを示している。左肺に相当する曲線では, 呼吸波の振幅が大きく週期が短かく, 左肺の代償性過換気の状態を示している。

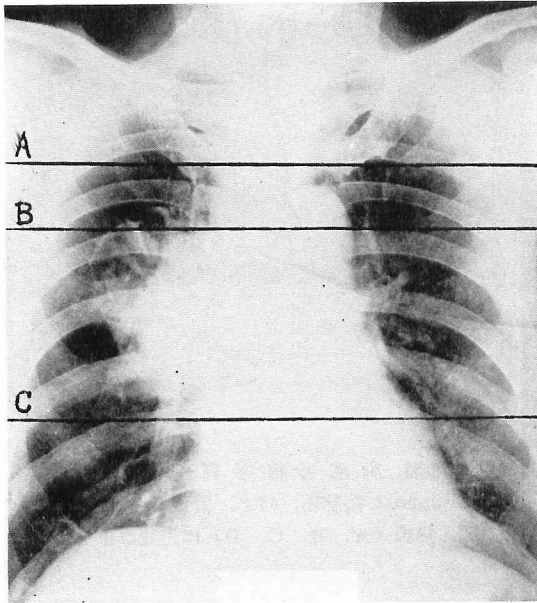
第22図は同一症例の胸部X線写真で, 第20図の胸部写真を撮影後8日を経過して撮影したものである。右全肺野が濃い均等な陰影で覆われている。第23図は胸部を左右に走査したキモグラムであるが, 第21図に示したキモグラムとは形を異にしている。即ち, 右肺に相当する曲線は, 基線からの高さが著明に増加し, 呼吸波が殆んど消失してをり, “initial emphysema”の状態から, 急速に無気肺の状態へ移行したことを示している。曲線Bの上に凹の部分に相当する右肺では未だ肺気腫の存在が考えられる。



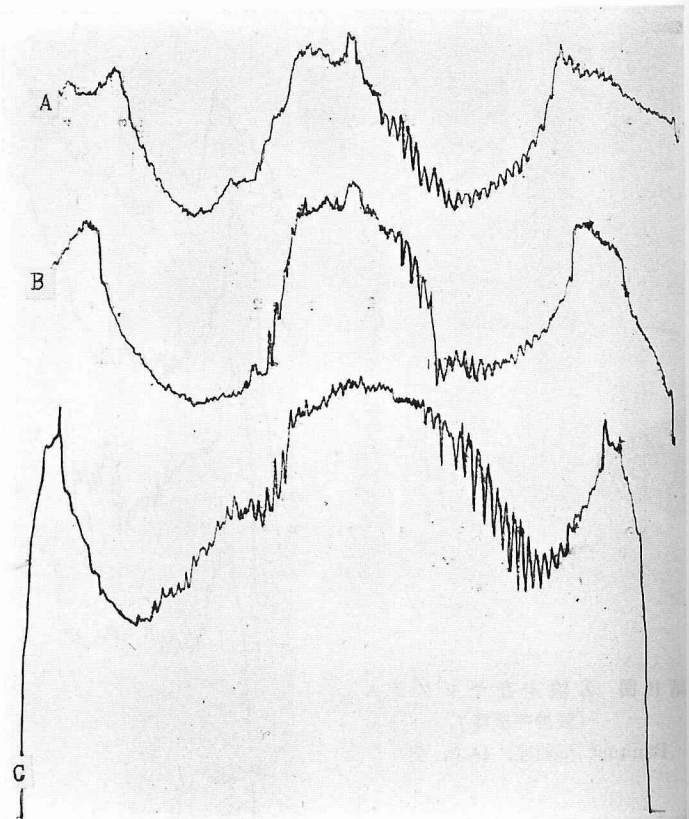
第18図 胸部 X線写真
Pancost 型肺癌, 44才, 男
黒線 (A, B, C, D) は走査部位を示す



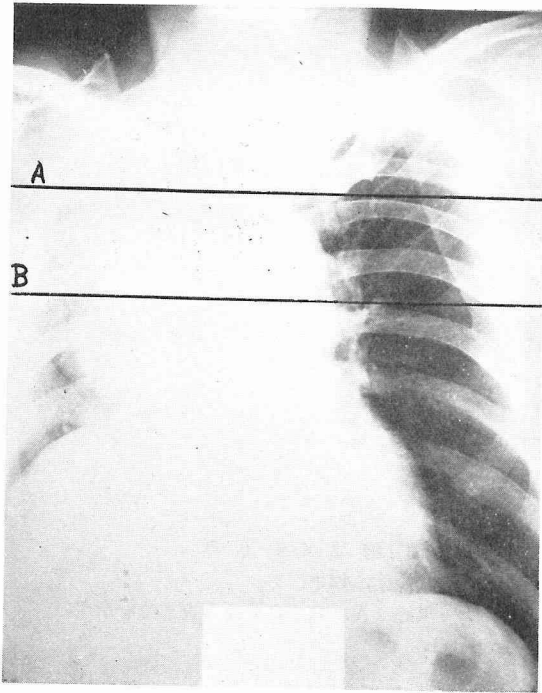
第19図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)
Pancost 型肺癌, 44才, 男



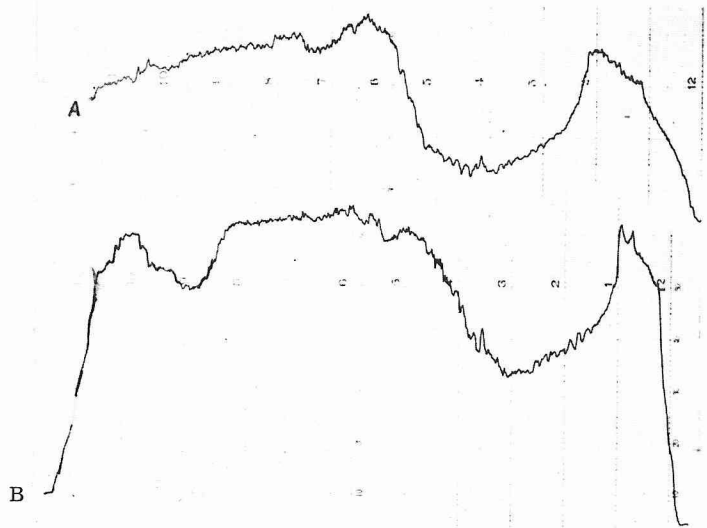
第20図 胸部 X 線写真
肺癌, 65才, 男
黒線 (A, B, C) は走査部位を示す



第21図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)
肺癌, 65才, 男



第22図 胸部 X線写真
 肺癌, 65才, 男
 黒線(A, B)は走査部位を示す



第23図 X線走査キモグラム
 (安静呼吸時)
 肺癌, 65才, 男

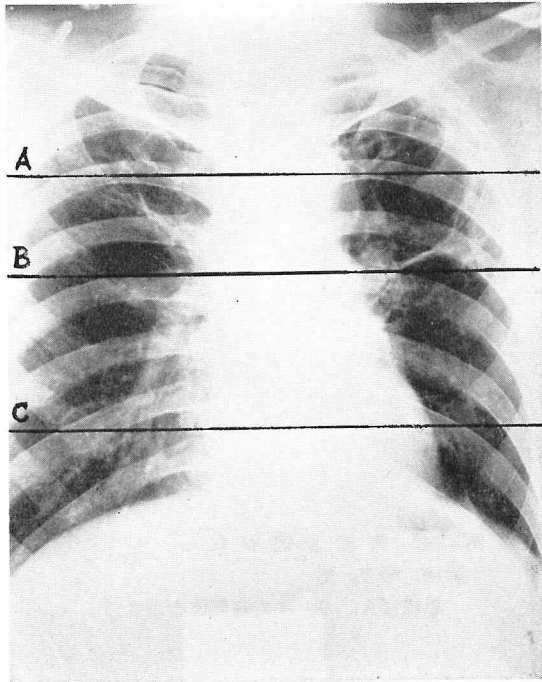
5. 肺結核症

第24図は42才, 男, 肺結核症の胸部 X線写真であり, 右上肺野に拇指頭大の比較的壁の厚い空洞があり, 左上肺野から中肺野にわたり壁の薄い巨大空洞が認められる。第25図は, 本症例の胸部を安静呼吸時に左右に走査したキモグラムである。曲線Aの右上肺野の空洞に相当する部位に, 両端が上に突出した陥凹が記録されている。両端の突出は空洞壁を表わし, 陥凹

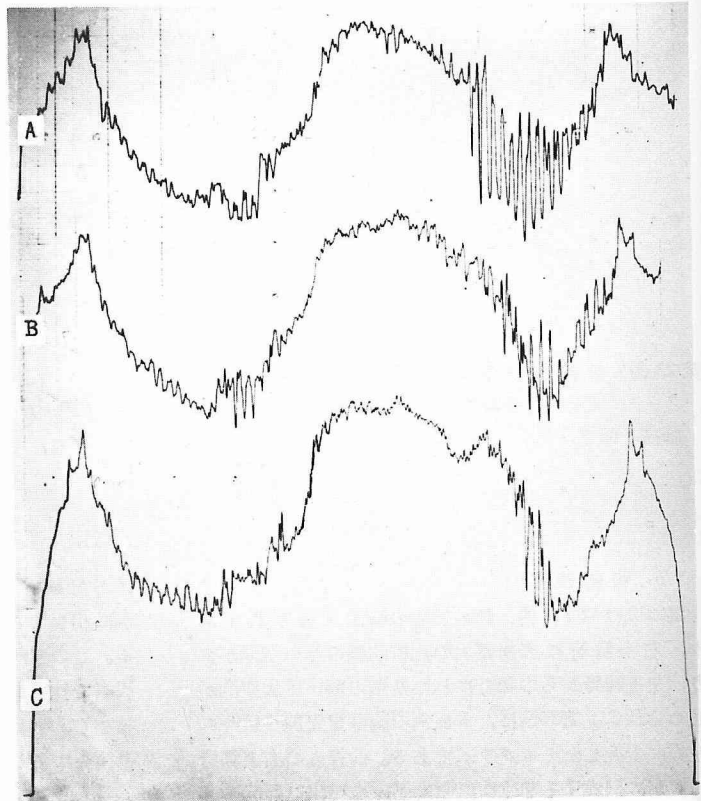
部が空洞を表わしている。曲線Aの左上肺野の巨大空洞に相当する部位には, 振巾の大きな波が認められる。この波は呼気時に高く, 吸気時に低くなることが観察され, このことより当症例の巨大空洞は呼気時に縮小し, 吸気時に拡大することが推定されて, X線透視検査により確かめられた。

6. 肺線維症

第26図は, 肺線維症, 74才, 男の胸部 X線写真であ



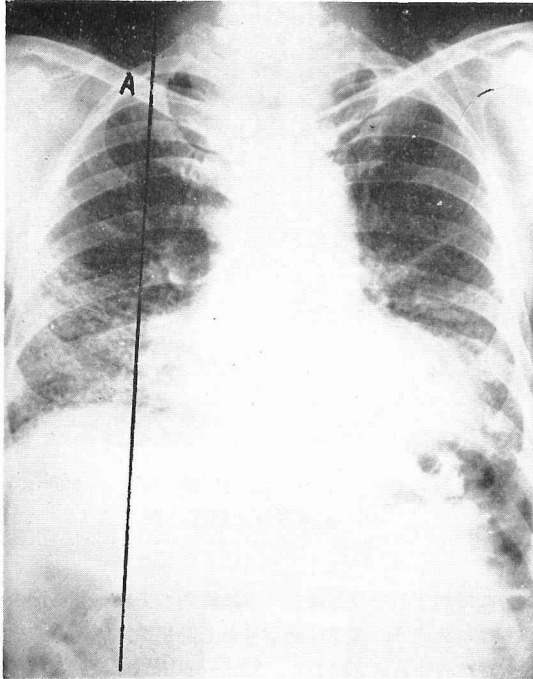
第24図 胸部 X線写真
肺結核症, 42才, 男
黒線 (A, B, C) は走査部位を示す



第25図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)
肺結核症, 42才, 男

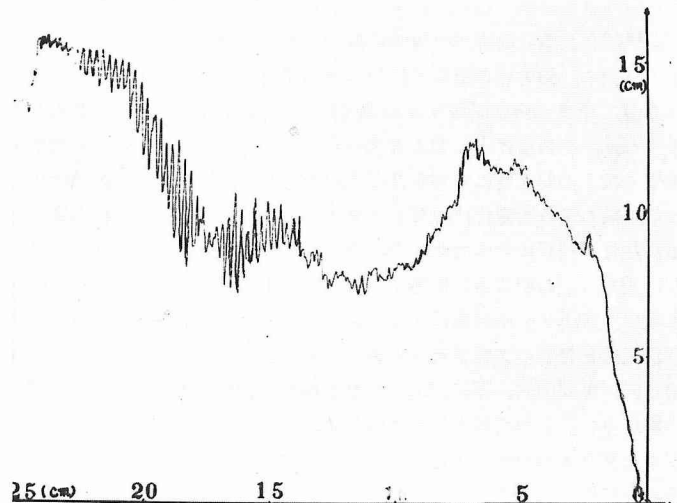
り、右側の中肺野から下肺野にわたり、線維性の異常陰影が認められる。第27図は本症例の胸部、第26図に示す部位を安静呼吸時に走査したキモグラムである。下肺野から中肺野に相当する曲線の部分が、上肺野に相当する曲線の部分より高く、上肺野の肺組織率^②（胸腔内径に対する肺組織の厚みの百分率-日本内科学会雑誌参照）が最大呼気時で14%と低下し、下肺野が36%と増加を示しているところより、上肺野に肺気

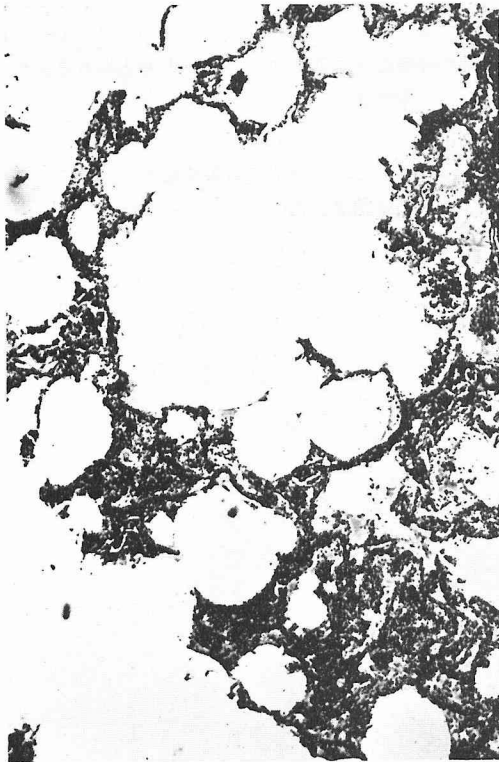
腫を下肺野に肺線維症の存在を推定させる。下肺野に相当する曲線の部位の呼吸波が大きいのは、横隔膜、肝部の呼吸波と重畳しているためと考えられる。剖検により上葉組織には第28図に示す如き肺胞壁の萎縮、破潰が著しく肺気腫の像が認められ、下葉組織には第29図に示す如く、肺胞壁の線維性肥厚が著しく、肺線維症の像が確認された。



第26図 胸部 X 線写真
肺線維症, 74才, 男

第27図 X線走査キモグラム
(安静呼吸時)
肺線維症, 74才, 男





第28図 右上葉組織像 (260×)
肺線維症, 74才, 男



第29図 右下葉組織像 (200×)
肺線維症, 74才, 男

考 按

胸部を透過したX線の螢光板上における明るさは呼吸に伴い変化するが、その変化に影響を及ぼす因子として胸廓軟部組織、肋骨、肺組織、血液及び肺含有空気が挙げられる。胸廓が吸気時に拡大し、呼気時に縮小する際に、胸廓軟部組織の厚みが変化すると考えられるが、著者が胸壁断層写真を撮影して計測した結果^①では、その差は少く殆んど現われなかつた。よつて螢光板上の明るさに影響を及ぼす因子として、胸廓軟部組織の厚みの変化は除外して考えることができる。肋骨が呼吸に伴つて動く際にX線ビームを横切り、螢光板上の明るさに影響を及ぼすが、本装置では管電圧 180 KVp の起高圧X線を使用しているので、軟部組織と骨質のX線透過度の差が少く、第7図B、第8図、第13図A、第21図にみられる如く肋骨による影響は少ない。よつて螢光板上の明るさ、即ち、X線走査キモグラムの呼吸による変化は、主として胸廓内因子の肺組織、肺血量及び肺含気量の変動によるものと考えられる。Sokolov^②は、肺野X線透過度が吸気時

に増加するのはX線ビームに直角の方向へ肺組織の伸展がおこり、X線に透過される肺組織の厚みが減少するためであると報告し、Steiner^①らは彼等の装置をスパイログラムと同記して、螢光板上の明るさの変化とスパイログラムとの間に、密接な関係のあることを知り、呼吸によるX線透過度の変動に及ぼす因子として、組織的因子の他に肺含気量の変化を主要なものと報告している。著者の研究においてもSteinerらの報告と同様に胸部X線透過度は呼気時に減少し、吸気時に増加することが観察され、肺換気と密接な関係のあることを認めた。呼吸による胸部X線透過度の増減に及ぼす因子として挙げるべきは、肺含気量の変化に直接関係する組織の伸縮及び肺血量の増減が考えられることは、Sokolov, Hess^④の主張する通りであろう。X線走査キモグラムより、肺含気量の変化と密接に関係する局所の肺組織の縮張、肺内血液量の増減並びに肺含気量の変化を総合した肺の機能状態を推定できるわけである。従来行われてきた局所肺機能検査法には、手技が難かしく、かつ患者への負担が大きいものが多いが、本法は操作が簡易で患者への負担が

少く、かつ換気機能のみならず肺組織の縮張、肺内血液量の増減する状態を総合的に観察できる利点を有している。

結 語

X線走査キモグラフィ（光電子増倍管、対数増巾器及び差動増巾器を用いて、入射X線線量と透過X線量の対数差を記録する一種のX線厚み計）を肋膜炎、気胸、肺結核症、肺腫瘍及び肺線維症の症例に施行し、肺機能殊に局所肺機能について検索し、次の結果を得た。

1. 走査キモグラムは、呼吸時に基線より高く、吸気時に低くなる波形を画き、この波の振幅は深呼吸で大きく、安静呼吸で小さくなり肺換気量の増減と密接な関連のあることが観察された。

2. 走査キモグラムの基線からの高さは、肋膜蓄水、肺組織の肥厚により上昇し、肺組織の伸展及び欠損により低下することが推定される。

3. 走査キモグラムは、肺局所の変化を鋭敏に反映し、この曲線より空洞、腫瘍の大きさ、その週囲の換気状態、限局した肺気腫並びに肺線維症の存在及び程度を推定できる。

4. 局所的な肺換気障害の存在する場合、残存する健康肺での代償性過換気の状態が走査キモグラムより推定できる。

稿を終るに当たり、御指導御校閲をいただいた恩師戸塚忠政教授に深甚なる謝意を表するとともに、本研究に終始御助言、御教示いただいた国立ガンセンター放射線科部長梅垣洋一郎博士（元信大放射線科教授）に感謝いたします。

本稿の要旨は、第22回日本医学放射線学会総会並びに第3回日本胸部疾患学会において発表した。

文 献

- ①Steiner R. E., Laws J. W. et al: Lancet, 2: 1051, 1960. ②峯木照夫: 日放誌, 19: 1926, 1960. ③Small M. J., Miller W. N. et al: J. A. M. A., 181: 384, 1962. ④梅垣洋一郎・丸山 清 等: 臨牀放射線, 7: 275, 1962. ⑤戸塚忠政・新村 明 等: 綜合臨牀, 11: 1102, 1962. ⑥戸塚忠政・溝上長男 等: 臨牀放射線, 7: 642, 1962. ⑦溝上長男: 日内誌, 投稿中. ⑧Sokolov I. U. N.: Vestn. Rentgenol. Radiol., 31: 20, 1956. ⑨Hess H.: Klin. Wschr., 40: 83, 1962.