

断層撮影－I. 序章・歴史*

Planigraphy - I. Introduction and history

Andrews, JR. Am J Roentgenol 36:575-87,1936

はじめに

断層撮影 (planigraphy) は、固体被写体の断層面を投影する X 線撮影の方法である。これは、X 線源と記録媒体を、両者を連結する機構によって投影面上にある軸の回りに同時に一定の速度で、反対方向に移動することにより行なうことができる。

具体的には次のような方法で実現できる (図 1)。O は被写体、B は目的とする撮影断面である。T は X 線管の陽極 (X 線の放射点) で、フィルム (記録媒体) F の露光中に矢印の方向に移動する。F は同時に反対方向に移動し、T と F は撮影される平面 B 上にある軸の回りに運動する。TB:BB' は一定であり、このため B 上のすべての点は記録媒体 F の対応する一に投影され、平面 A、C 上のすべての点は、記録媒体のさまざまな異なる位置に投影される。従って、記録媒体には平面 B の正確な像が投影され、その他の平面の画像はボケる。このボケの程度は平面 B からの距離に依存する。

この関係は、Ziedses des Plantes[27]、Bartelink[2]、Gorssmann[9] らにより示されている

断層撮影開発の歴史

方法 1, 2, 3

Bocage[4] は、1921 年 6 月 3 日申請のフランス国特許で、初めて断層 X 線撮影の原理を記載した。この中には、以下のような 3 つの断層撮影法が含まれている (Ott の引用 [11])。

方法 1. 記録媒体の露光中に、X 線源を記録媒体と同時に平行に、直線状に移動する。露光中、中心線束 CR は平面 B と垂直の面内にある。図 1 に模式図を示す。

方法 2. X 線と記録媒体が同時に平行面内を移動するが、直線状ではなく、円形、方形、十字形、あるいはアルキメデスらせん形に移動する。ここでも露光中、中心線束は平面 B と垂直の面内にある。図 2a に模式図を示す。ここで S は管球 T が露光中に移動するらせん軌道である。対応する記録媒体は同様のらせん軌道 S' を移動する。TB:BB' は一定に保たれる。

方法 3. X 線源と記録媒体は、平行に動くのではなく、断層面内にある軸の周りに回転する。ここでも露光中、中心線束は平面 B と垂直の面内にある。図 2b に模式

図を示す。ここで TB:BB' は露光中一定に保たれる。

以下、これらの方法は番号で記載するものとする。

図 2c には、米国の標準的な X 線検査装置にこれを非常に単純に応用する方法を示すが、不正確なものとなる。X 線線源は、平面 B 内の軸の周りに回転し、中心 X 線束はこの平面に垂直に保たれる。しかし、記録媒体 F は、平面 B 内の軸の周りを回転するのではなく、平面 B に平行な平面内を移動する。TB:BB' は、一定ではなく、T-F の移動範囲内で変化し、従って平面 B への投影は不正確となる。

Portes & Chausse は [13]、Bocage の特許の 4 か月後に方法 2 を記載しており、放射線治療において深部に線量を集中させる用途に言及している [11]。

1927 年、Pohl は [12] はその特許で、この方法の原理について述べている。

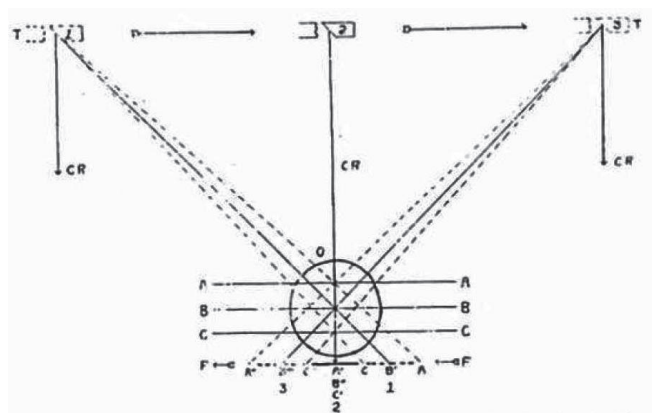


図 1. 方法 1(Bocage) による断層法の原理 (説明は本文参照)

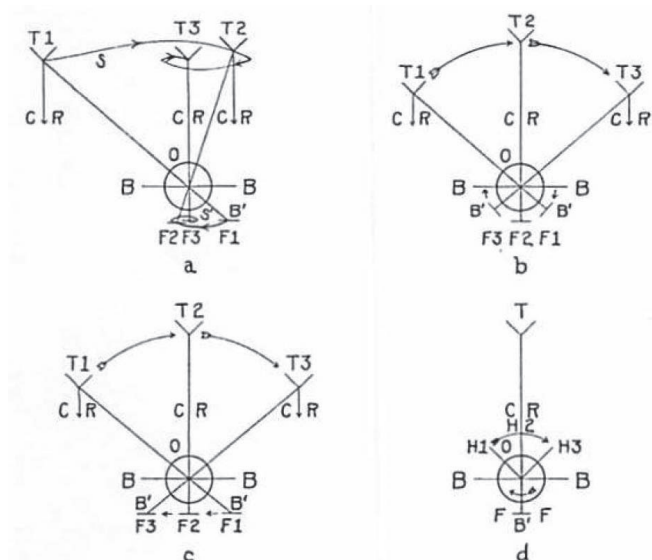


図 2. (a) 方法 2(Bocage), (b) 方法 3(Bocage), (c) 断層法の原理の誤った使用法, (d)Vallebbona の "stratigraphy" (図 3 参照). 説明は本文参照。

*Cleveland 大学病院

[†] 本稿は放射線科大学院の博士論文研究の一環として、Pennsylvania 大学医学部大学院に提出した学位論文の第 1 部である。

方法 4 とその初の医学応用

Vallebona は [14] は、自身が "stratigrams" と呼ぶ断層 X 線撮影法を初めて実用に供した。しかしこの方法は、X 線源と記録媒体を固定して、被写体自体を目的とする断層面内の軸の周りに回転させるという点で他の研究者のものと異なっている。この方法を図 2d に示す。ここで T, F は固定されており、被写体 O が面 B 内にある軸の周りに回転する。図 3 に Vallebona の装置を示す。ここで水平面 S にフィルムを置き、通常の X 線撮影と同じようにその中心線上に X 線管球を位置させる。

被写体は揺り椅子 R に固定し、R を調節可能なピボット軸 P で揺り椅子架台 A に目的とする断層面の高さに取り付け、露光中にハンドル H でこれを回転する。この装置を使って Vallebona は頭蓋を撮影し、その初報に掲載している。この方法は、患者を揺り椅子に固定することが実際的には困難であったことから、医用撮影法としてそれ以上の発展をみることはなかった。従って、本稿でもこれ以上は論じない。

しかし Vallebona は他の方法を考案して、それを発展させた。1933 年に新しい改良型を開発して、論文を発表した [16]。これを方法 4 "stratigraphy" とする。

方法 4 "Stratigraphy"

X 線源と記録媒体は、(方法 3 と同じように)断層面内の軸の周りに回転する。この方法では、中心線束は断層面に垂直ではなく、常に記録媒体に垂直に保たれ、断層面と垂直になるのは回転中の 1 点のみである。図 4 にこれを示す。患者はフィルム架台の上に載せ、装置全体の回転軸は支柱の任意の高さに固定でき、患者-フィルム間距離は揺り椅子のアームの調節スライドで変更できる。TB:BB' は調節スライドによって変化するが、いったん調節すればそれ以後は一定となる。これは非常に単純で実地的な方法である。

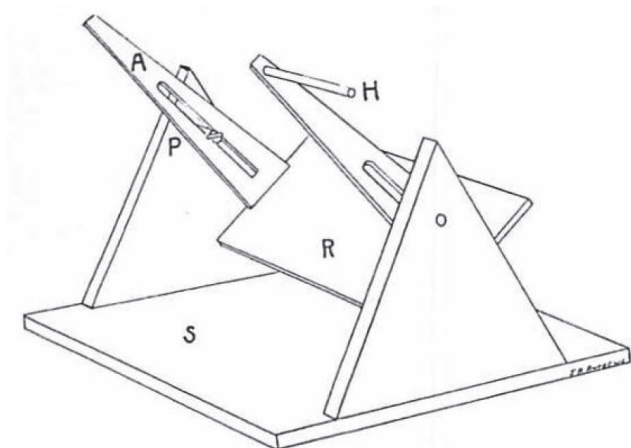


図 3. Vallebona の "stratigraphy" の装置。説明は本文参照。

方法 5 とその発展形

Ziedses des Plantes は、著者との私信およびその学位論文 [27] において、1921 ~ 22 年に独立してこの方法を発明したとのべているが、実際に取り組んだのは最初の論文 [21] を発表した 1928 ~ 31 年のことであった。彼はまたその後 1933 年に、1921 年の Bocage の特許、1927 年の Pohl の特許を知ったが、そのいずれも実用に供していないことも知った。その後さらに、Vallebona の研究についても知った。

Ziedses des Plantes に断層撮影発明の独立したクレジットを認められるか、という問題については、Bocage, Portes & Chausse, Pohl, Vallebona の方が先にその原理を記載していることは明らかではあるが、彼の学位論文の内容は他の研究者よりも完備したものであると言うことはできる。従って、ここではこれを方法 5 として取上げることとする。

方法 5

X 線源と記録媒体は、同期して (Bocage の方法 2 のように) 平行線、円形、あるいはらせん形に運動する。

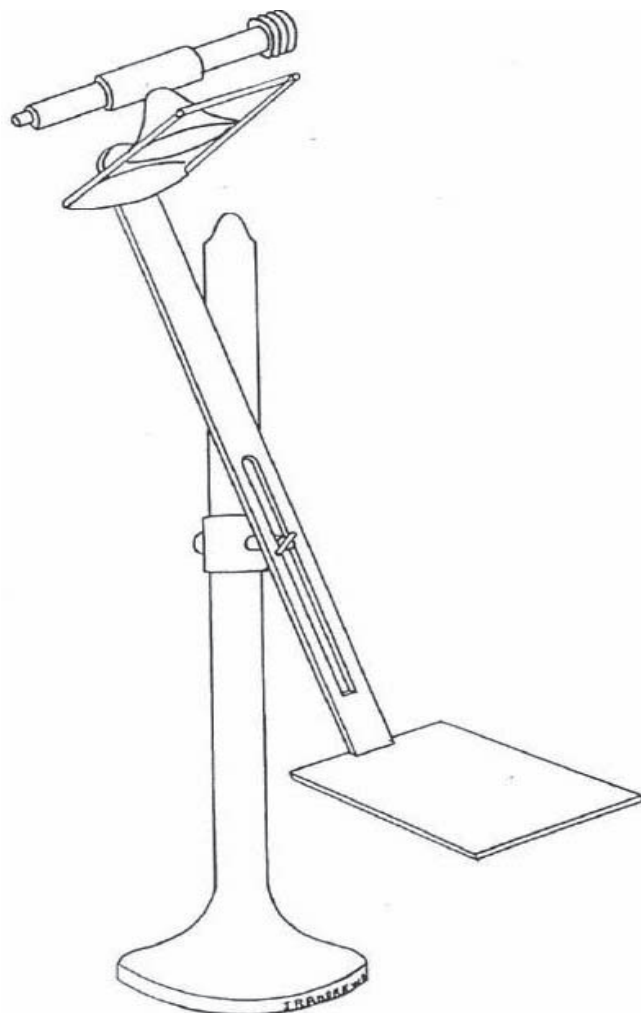


図 4. 方法 4 "stratigraphy" (Vallebona). 垂直支柱に回転軸で振り腕が取り付けられ、その高さを調節できる。振り腕の上端に X 線管球、下端にフィルムカセットを取付ける。被検者は、管球とカセットの間にあるテーブルに載せる。

しかし同時に X 線管球が回転することにより、中心線束は常にフィルム上の同じ点に向けられており (図 7)、この点において他の方法と異なっている。図 5 にこれを示す。X 線管球とフィルムは露光中に、被写体の 1 面のみ (平面 v) が連続的にフィルムの 1 つの同じ点に投影されるように運動する。被写体のその他の点はすべて移動している。これは、管球とフィルムが同時に移動することにより実現され、フィルムは ABCD から abcd へ、管球は F から f へ移動する。この図は円運動を示しているが、Ziedses des Plantes は実際には断層面外のボケがより大きく、面外の影響がより少なくなると考えられるらせん形軌道を一般に使用している。これは特に、直線あるいは曲線で境界されている領域で明らかである。

図 6 は露光中の状態をより正確に示したものである。管球が F から f へ、フィルムが ABCD から abcd へ移動するとき、投影点 G, H はフィルム上の同じ位置にある。しかし点 K は、一時点では H と同じ位置にあるが、その後は h から k に移動する。この結果、K の像はボケることになる。

図 7 は、露光中の装置全体の運動を示す模式図である。X 線管球 R が支持フレーム A と共に移動し、この動きは連結桿 H によってフィルム F に伝達される。H は任意に位置を設定できる点 S の周りに回転する。管球 R は、中心線束が運動中常にフィルム上の同じ点を向くように回転する。散乱線吸収用のグリッドを管球 R と被写体 O の間に置くこともできる。

図 8 は、Ziedses des Plantes が約 5 年間使用した装置の写真である。X 線管球 R は全体の支持フレーム A と同時に、任意の水平方向に移動できる。これは、移動装置 K が検査テーブル全長にわたってスライドして移動する際に、フレーム A がこれと垂直に動くことにより可能となっている。この動きは、点 S を回転軸とする連結桿 H によってフィルムに伝達される。

支持フレーム A の下部の移動棒はコード D によって床上のペグ P につながっている。露光中にこのフレーム A の下部を手動で回転することにより、可動部分に力が加わる。回転運動によってコードがペグに巻き付き、この結果移動桿とフレーム全体が次第にらせん運動の中心に移動してゆく。大きなペグを使うと、らせん運動は大きくなる。従って、必要に応じて異なる大きさのペグ (P-1, P-2, P-3, P-4) が用意されている。Ziedses des Plantes は、被写体とフィルムの間に散乱線除去用のグリッドを間置することを提案している。

断層面の深さのフィルムへの記録

断層面の深さは、Ziedses des Plantes が設計した小さな測定器によってフィルムに正確に記録することができる。これは木製のシリンダーに、高さに応じた金属製の数字を埋め込んだものである。さらに各数字の間には 9 個の鉛散弾が、それぞれ 1mm の高低差で並んでいる。この測定器の側面像を図 9a に、深さ 5cm の断層像を図 9b、深さ 5.4cm の断層像を図 9c に示す。図 9c では、4 個目の散弾が最も鮮明にうつっている。

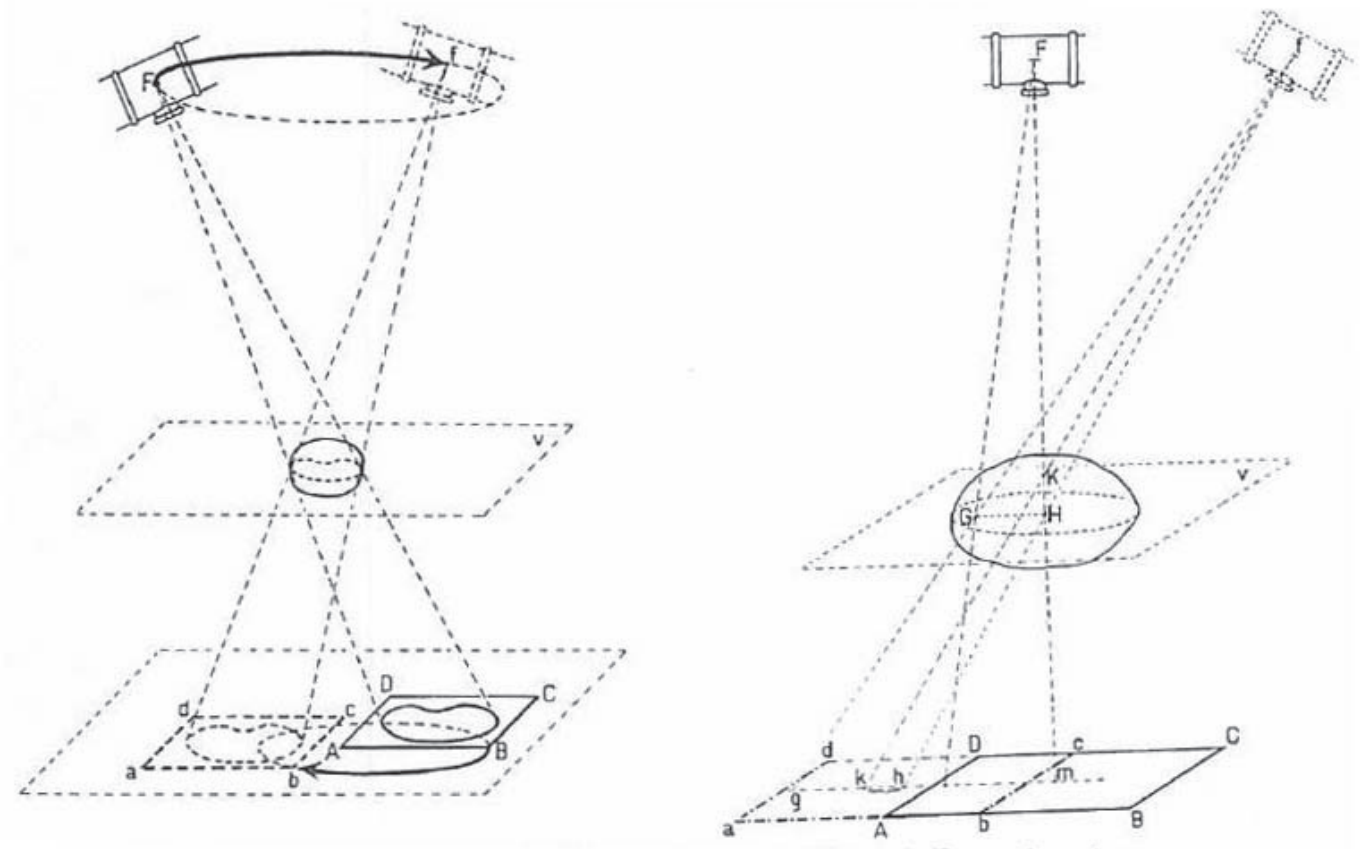


図 5, 6. 方法 5(Ziedses des Plantes). 説明は本文参照.

実際の断層撮影にあたっては、この測定器を被写体の側に垂直に置き、被写体、フィルムと同時に撮影する。

図 10 は、断層面の深さを事前に決定する方法を示す。通常の側面撮影を行ない、歪みの補正後にフィルムから直接、検査テーブルからの高さを決定する。

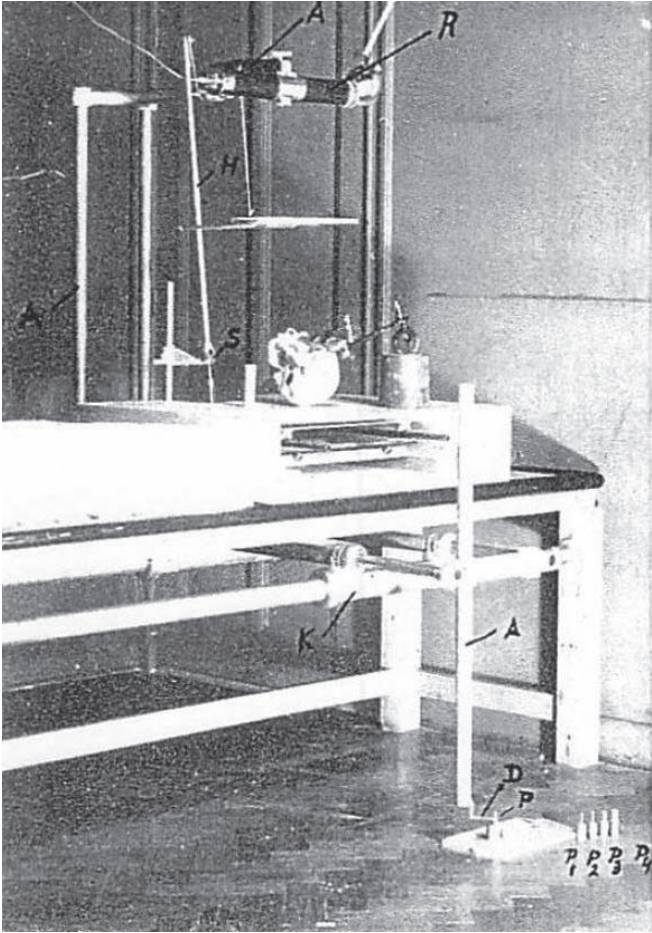


図 7. Ziedses des Plantes の断層撮影装置.

Ziedses des Plantes は、頭蓋および頭蓋内容の正常像、異常像について特に研究している。図 11 は頭蓋標本の後前撮影である。図 12 はこれと同じ頭蓋の、後方から (測定器からわかるように) 3.2cm の位置から最前部までの前額面断層像である。1. 鼻中隔, 2. 篩骨洞の一部, 3. 下・中鼻甲介, 4. 眼窩内側壁, 5. 上顎洞壁が詳細に見える。図 13 は別の頭蓋の X 線写真, 図 14,

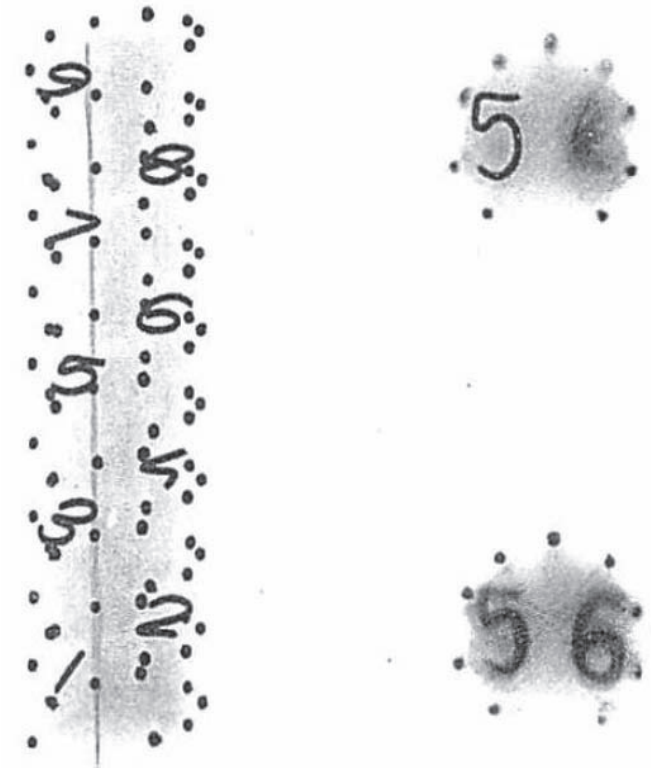


図 9. (a) Ziedses des Plantes の断層位置の測定器の側面 X 線像. (b, 右上). 深さ 5cm における測定器の断層像. (c, 右下). 深さ 5.4cm における測定器の断層像. 説明は本文参照.

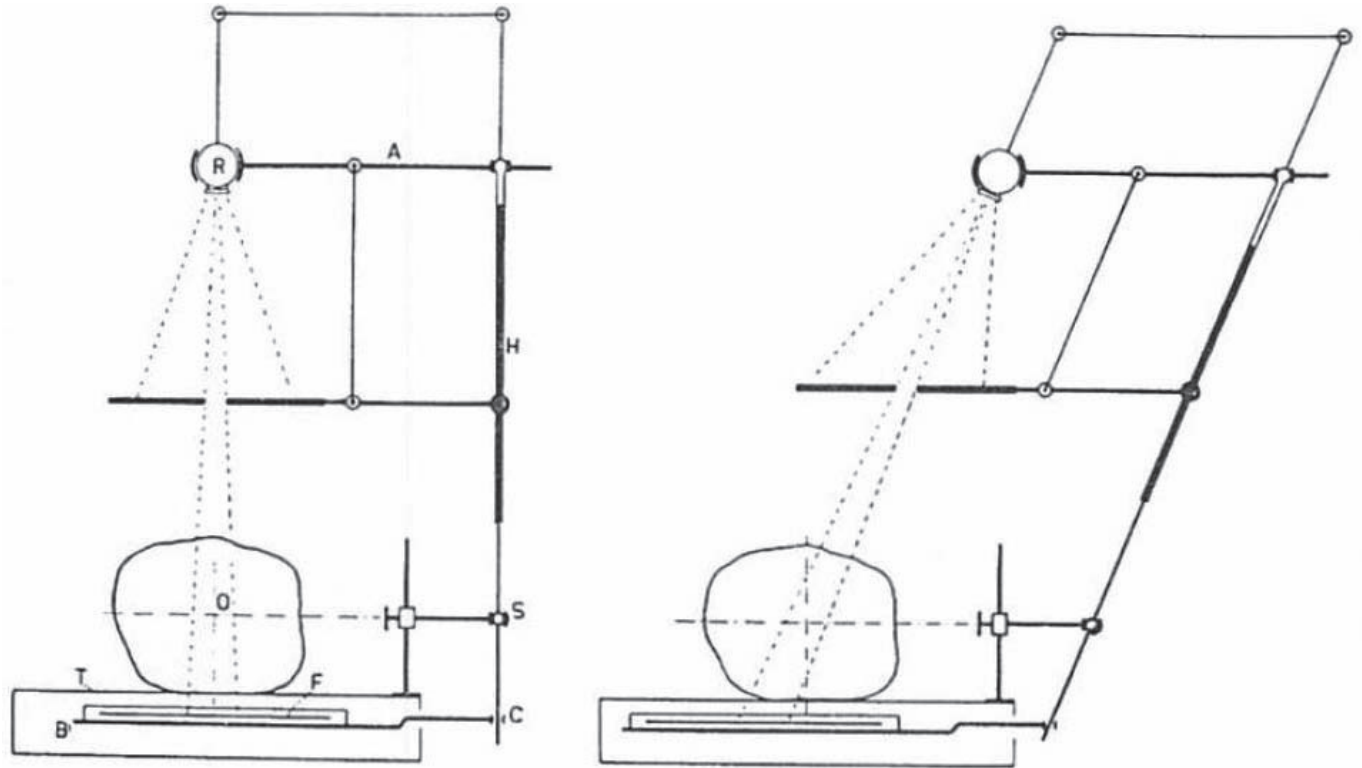


図 8. Ziedses des Plantes の断層撮影装置. 説明は本文参照.

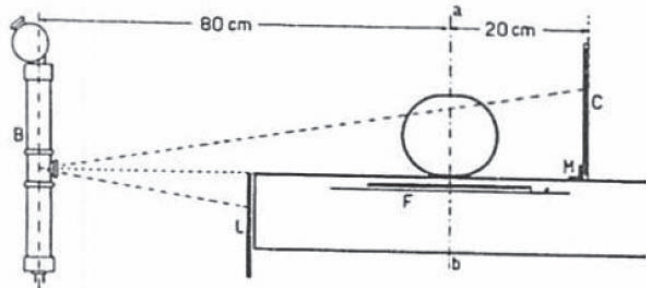


図 10. 事前の側面 X 線撮影により，断層面の深さを決定する方法. 説明は本文参照.

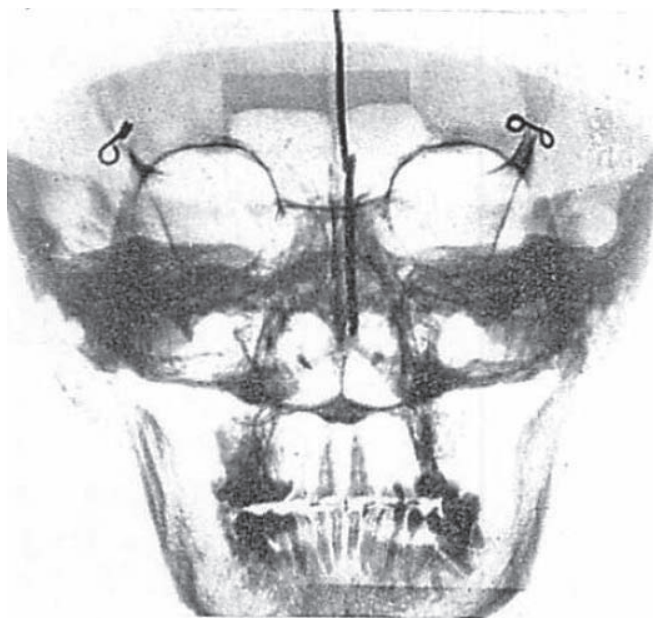


図 11. 頭蓋標本の X 線写真.

15, 16 はこれと同じ頭蓋の，異なる深さの断層像である. 図 14: 6. 視交叉溝, 7. 前床突起, 8. 上眼窩裂, 9. 蝶形骨洞, 10. 後鼻孔後縁. 図 15: 11. トルコ鞍底, 12. 蝶形骨洞底, 13. 鋤骨翼, 14. 内側翼突起. 図 16: 15. 鞍背, 14/16. 外側翼突起内 / 外板. 断層撮影で見えている輪郭はすべて通常の X 線でも見えるはずであるが，重畳する多数の輪郭線や陰影のためにしばしば同定できない. このように，断層撮影では任意の一断

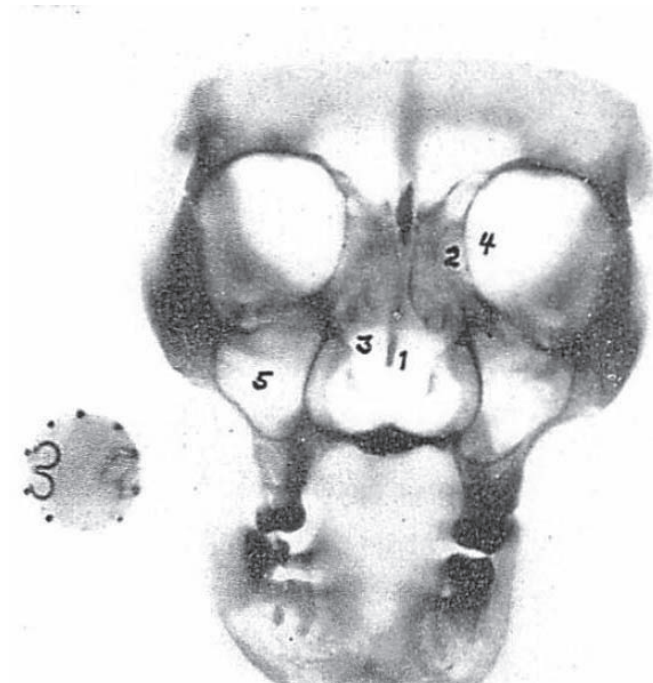


図 12. 図 11 と同じ頭蓋標本の全面から 3.2cm の位置の断層撮影. 数字で示す構造については本文参照.

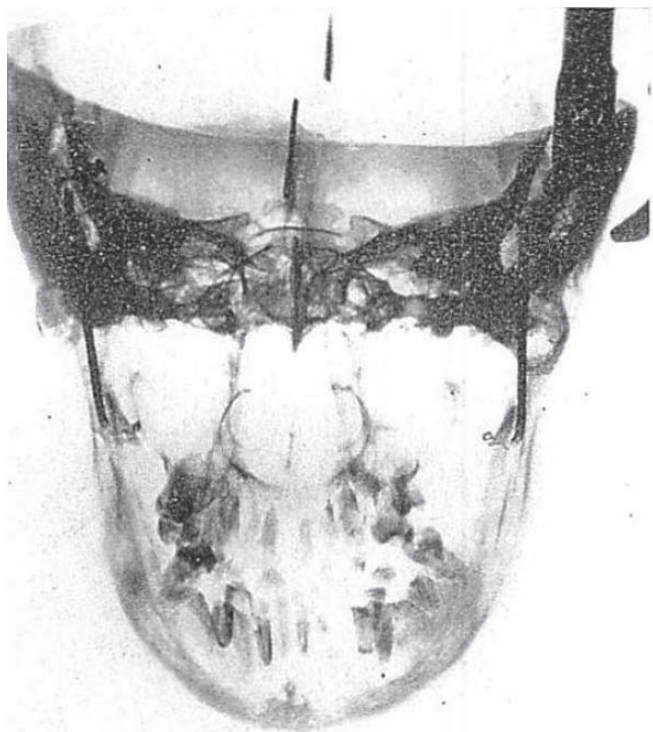


図 13. 頭蓋標本の X 線写真.

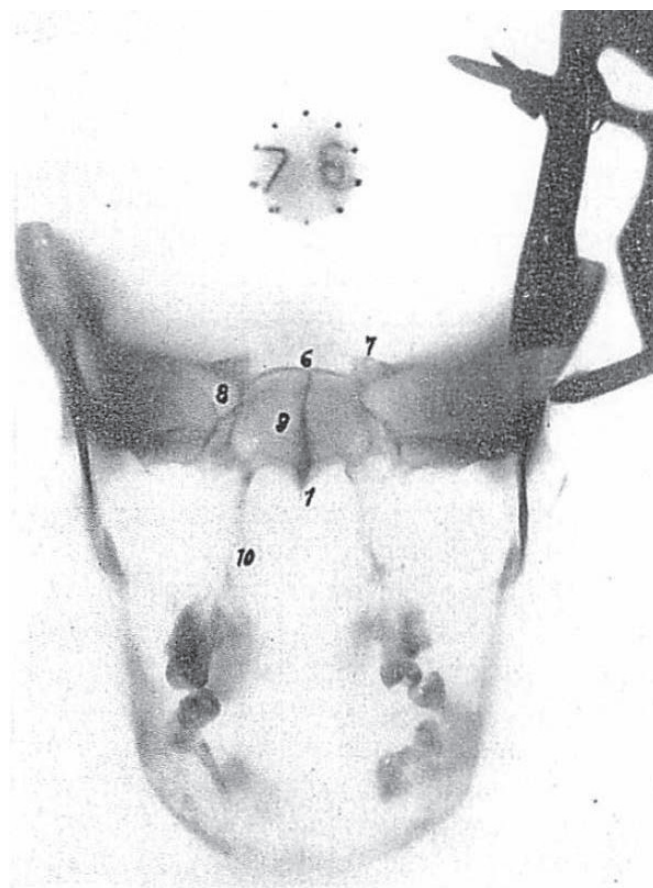


図 14. 図 13 と同じ頭蓋標本の断層像. 数字で示す構造については本文参照.

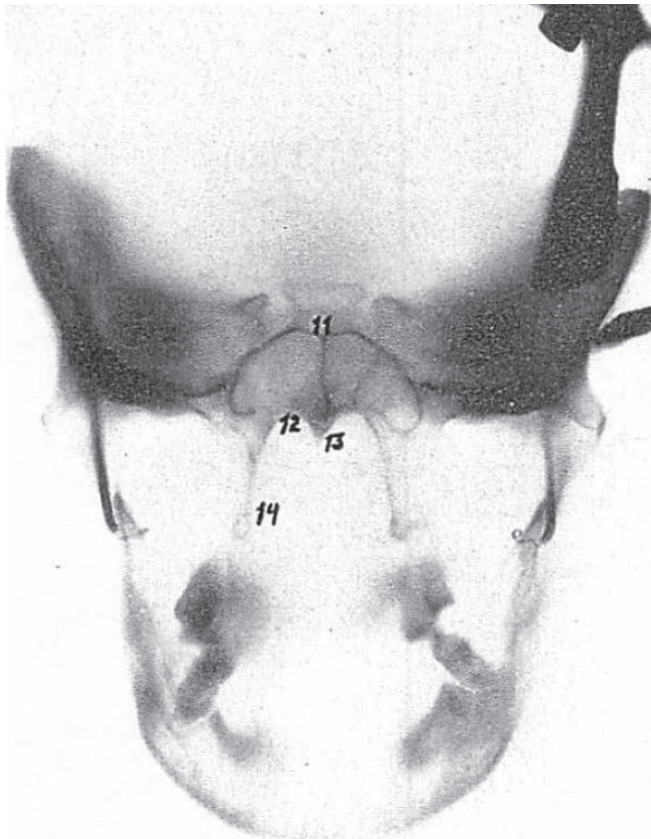


図 15. 図 13 と同じ頭蓋標本の断層像. 数字で示す構造については本文参照.

面の詳細が、その上下にある陰影のボケによって明瞭になる。

Ziedses des Plantes による 1931 年の初報後、1931 年 11 月 2 日に Bartelink[1] は Amsterdam のオランダ電気学レントゲン学協会の集会で、同様な方法で撮影された結果を供覧した。この装置の模式図を図 17 に示す。その原理は、基本的に方法 4 と同じである。しかし Bartelink の装置では、可動部分の回転軸の位置は固定されており、支持台からの被写体の高さを動かして断層面を決めるようになっている。この方法は、Vallebona のものに比べると実用的ではない。

1934 年 1 月、Siemens-Reiniger 社が、研究用断層撮影装置を製作した。

方法 6 "Tomography" とその発展

Grossmann は [9]、断層撮影の原理について数学的、幾何学的に徹底的に研究した。その結論は、従前に報告された方法、装置には多くの不利があるというものであった。中心部に濃い陰影がある場合を除き、面積が広い場合は障害となる陰影を除去することができないことが多い。また円運動では少なくとも 3～5 倍の X 線量が必要で、らせん運動では 10～15 倍にもなり、これは実際的には難しい条件である。散乱線吸収用グリッドを使用すると、露光時間はさらに延長して制約はさらに大きくなる。また Vallebona の方法を例外として、いずれの方法でも装置が非常に複雑で、X 線

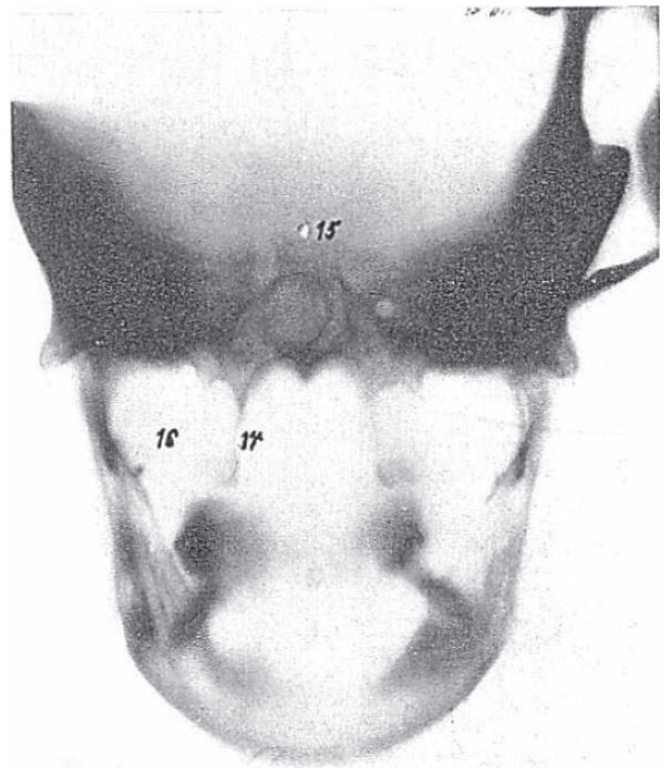


図 16. 図 13 と同じ頭蓋標本の断層像. 数字で示す構造については本文参照.

管球とフィルムの移動だけでなく、(特に Ziedses des Plantes の装置では)X 線管球を縦方向、横方向に振動させる必要がある。このような装置で明瞭な断層像を得るには、フィルムと管球の運動の正確な協調が必要で、装置を正確に調整することは非常に難しい。

Grossmann は、やや異なる断層法を記載し、これを "tomograph" と呼んだ。この原理を方法 6 とする。

方法 6

原理は Bocage の方法 3、Vallebona の方法 4 に多少手を加えたものである。図 18、図 19 に方法と装置を模式的に示す。P1、P2 は軸 A の周りに回転する 2 本の振子腕で、A の高さは支柱 S 上のスライド枠 V によって調節できる。A は検査テーブル T 上の被検者の断層面である平面 Aee にある。G はカウンターウェイトである。P に垂直、T に平行なアーム D1、D2 があり、D1 に X 線管球 R を、D2 にはフィルムとグリッドを取付ける。A から D1、D2 までの距離は可変である。フィルムカセット K、グリッド B を載せたトレイ H は、軸 C に固定されており、C は線 RA 上で振子腕に回転軸を持つ。トレイ H には延長部があり、可動腕 L 上の Y に回転軸を持ち (図 19)、さらに L は平面 Aee 上の V、Z に回転軸を持つ。この装置では、フィルムとグリッドは運動中も常に水平に保たれる。この点が Bocage の方法 3、Vallebona の方法 4 と異なるところである。中心線束は断層面の中心を通過し、露光中は常に中心

線束と線 Aee の交点に向けられ、断層面に垂直で回転中はこの一点にのみ投影される。ここで RA:AC (TB:BB' に相当) は回転中一定に保たれる。

管球位置 F1 の時、振子は管球 R とともに留め具で留められている。振子が解放されると、自重とカウンターウェイトの慣性で回転して管球位置 F2 から F3 へと移動し、ここでもうひとつの留め具によって振子は自動的に回転を停止する。管球は振子の回転中はオンとなり、振子が解放された直後から露光が開始され、振子が停止する直前に露光を終了する。露光は、振子腕と静止支持部に接続した開閉器によって自動的にオン、オフされる。

Grossmann の装置は現在ドイツで "Tomograph" の名称で市販されている。Grossmann はこの装置の幾つか

の利点を述べており、これまで開発された中で最も単純かつ最も実用的な断層撮影装置としている。また、この方法では広範囲の障害となる陰影も減弱することができ、中心部の障害となる陰影も少数の例で発生するのみであるとしている。散乱線吸収用のグリッドも、露光時間を延長することなく使用することができ、短時間曝射 (~ 1 秒) が可能である。彼は幾何学的、写真物理学的検討から [9]、障害となる陰影は円運動よりらせん運動で減少できるとしている。しかしこのような陰影は、振子運動による管球焦点の移動が十分大きければ、それによって効果的に除去でき、円運動、らせん運動の場合と同程度に除去できる。これを図 20 に示す。

断層撮影法の臨牀的ならびに疾患への応用

Chaoul は [5,6,7] は、Grossmann の断層撮影装置を使用して肺の正常像、異常像について研究した。そして多くの連続撮影により、肺血管とその分枝、気管支とその病的状態が明瞭となり、空洞が明瞭に描出、同定でき、通常の立体撮影ではわからない局在病変からの病変の広がり描出できることを示した。彼の論文には、正常肺解剖、空洞を伴う／伴わない湿性／線維性結核病変、肺癌などの素晴らしい X 線写真、断層写真

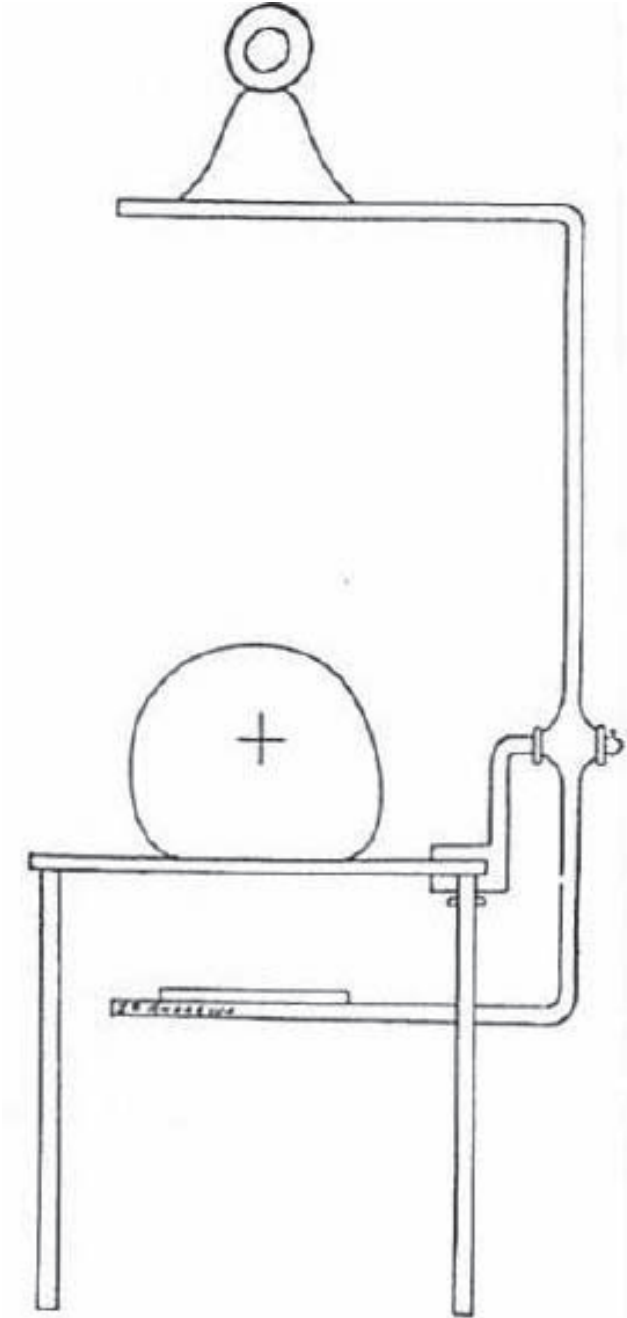


図 17. Bartelink の断層撮影装置。X 線管球とフィルムカセットが、固定回転軸の周りに回転し、テーブル上の被写体の高さを定めることにより断層面を決める。

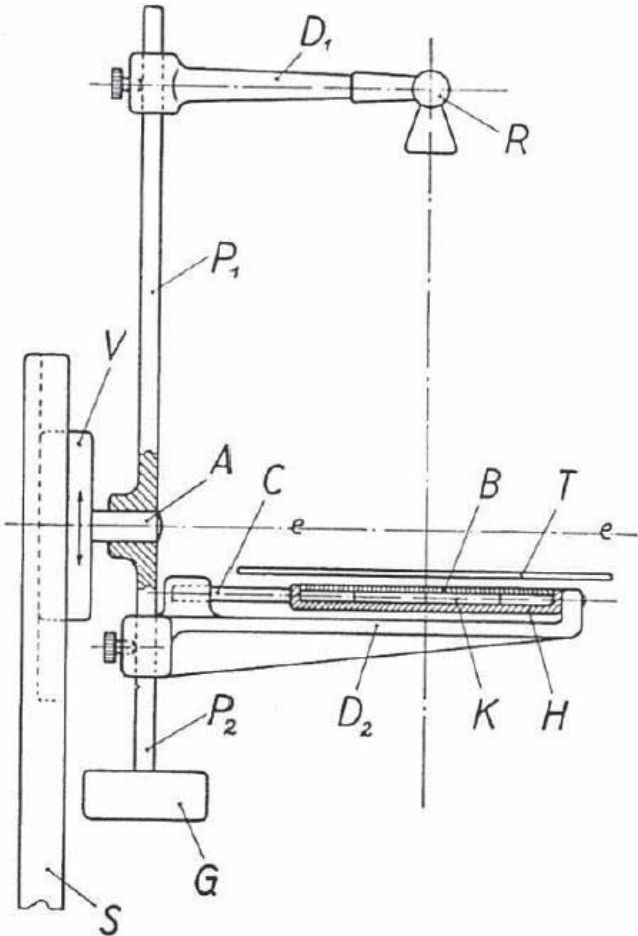


図 18. 方法 6(Grossmann) の "tomograph". 説明は本文参照.

が掲載されている。

本研究の第1部を終えるに当り, "planigraphy", "stratigraphy", "tomography" という用語について付言しておきたい. "planigraphy" は, その起源を追跡することはできなかったが, 他の用語よりも以前から使用されている. ラテン語 (planus, 面) に由来し, 平面の表面を指す言葉である. "stratigraphy" は, ラテン語 (sternere, stratum: 広がる, 生物学では組織の層) に由来し, 組織の層を意味している. "tomography" はギリシア語 (τόμος 断端) に由来し, 切断面を意味する. 著者は, 時間的優先度の点から断層撮影一般の呼称としては "planigraphy" とその派生語の使用し, "stratigraphy", "tomography" はそれぞれ方法4(Vallebona), 方法6(Grossmann) の特殊な方法をさして使用することを推奨する.

付記

著者は本稿の執筆を開始後, Connecticut 州 Norwich の Jean Kieffer 氏が, 断層撮影の原理を独自に発見し, 装置を開発していたことを知った.

この装置は 1929 年に発明され, 当時国内で特許が申請されている. この特許は 1934 年に認可された. 従って 1929 年におけるこの発明は, Vallebona, Ziedses des Plantes, Grossmann に先行していたことになる. 発明者の好意により, その装置の概観図を図 21 に示す. 発明者自身はこれを "x-ray focusing machine" (X 線集光装置) と名づけているが, 方法は著者が "planigraphy" としたものである. X 線管球 T (図 21) はレールに取付けられ, 任意の水平方向に移動できる.

モーターで駆動され円形あるいはらせん形に運動する回転板 R に連結された剛性系で, この運動が管球に伝達される. X 線管球と回転板は, P で自在継手に連結した連結桿によってフィルム F に伝達される. 従って, 管球と回転板の動きは連結桿によってフィルム F に伝達され, フィルムはグリッドと共にレールに取付けられ, これも任意の水平方向に移動できる. 被写体の断層面は, 連結桿と管球の垂直支柱上の点 P を調節することで決定される.

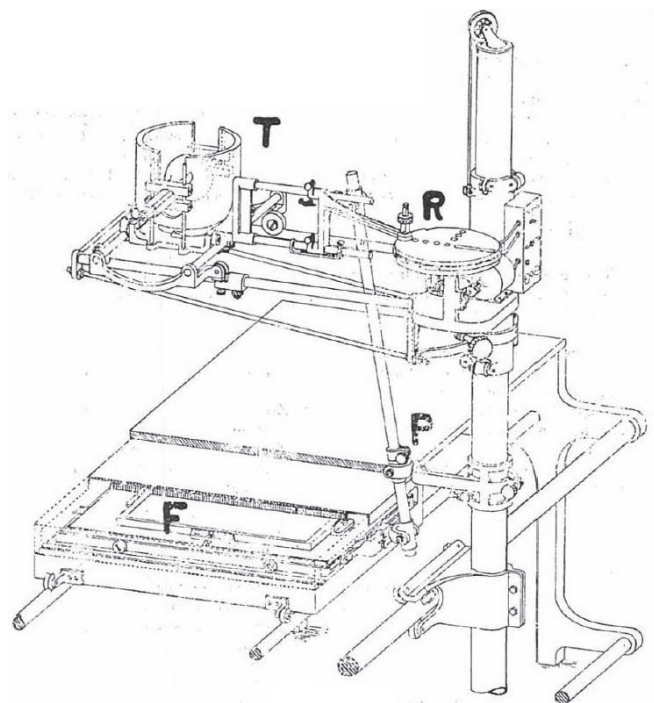


図 21. Kieffer の断層撮影装置.

1. BARTELINK, D. L. Roentgen Section. *Nederl. tijdschr. v. geneesk.*, 1932, 76, 23.
2. BARTELINK, D. L. Method of obtaining clear pictures of a limited area by blocking out superfluous parts. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1933, 47, 399-407.
3. BARTELINK, D. L. Discussion of papers of Ott, Chaoul, and Grossmann. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 49.
4. BOCAGE, A. E. M. French patent No. 536464 (1922).
5. CHAUL, H. Tomography, with particular reference to its application in lung diagnosis. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 342-356.
6. CHAUL, H. A new roentgenographic procedure in lung diagnosis; roentgenograms of sections of the lungs (tomography). *Deutsche med. Wchnschr.*, 1935, 61, 700-703.
7. CHAUL, H. A new investigative procedure for the representation of body sections and its application in lung diagnosis. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 43.
8. FRIK, KARL, and OTT, PAUL. What are roentgenologic body section pictures able to accomplish at present? *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1934, 50, 423-428.
9. GROSSMANN, G. Tomography I and II. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 61-80; 191-209.
10. GROSSMANN, G. Practical considerations of tomography. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 44.
11. OTT, PAUL. The present day accomplishments of body section visualization. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 40-43.
12. POHL, E. Imperial German patent, No. 544200 (1927-1932) and Switzerland, No. 155613 (1930-1932).
13. PORTES, F., and CHAUSSE, M. French patent No. 541941 (1922).
14. VALLEBONA, A. A modified technique of roentgenographic dissociation of shadows applied to the study of the skull. *Radiol. med.*, 1930, 17, 1090-1097. Abs. *Radiology*, 1931, 17, 647.
15. VALLEBONA, A. Radiography with great enlargement (microradiography) and a technical method for the radiographic dissociation of the shadow. *Radiology*, 1931, 17, 340-341.
16. VALLEBONA, A. A method of taking roentgenograms which makes it possible to eliminate shadows. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1933, 48, 561-605.
17. VAN DER PLAATS, G. J. So-called planigraphy with roentgen rays. *Nederl. tijdschr. v. geneesk.*, 1932, 76, 1081-1085.
18. VAN DER PLAATS, G. J. Some remarks on the system of planigraphy in x-ray work, x-ray research and development. N. V. Phillips Gloeilampenfabrieken, 182, Eindhoven, Netherlands, 1933.
19. VOGT, O. Short technical explanation of the tomograph for pictures of body sections. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 44-46.
20. ZIEDES DES PLANTES, B. G. Personal communication.
21. ZIEDES DES PLANTES, B. G. A different method for making roentgenograms of the skull and spinal column. *Nederl. tijdschr. v. geneesk.*, 1931, 75, 5218-5222.
22. ZIEDES DES PLANTES, B. G. Planigraphic method in roentgenology. *Nederl. tijdschr. v. geneesk.*, 1932, 76, 2796-2799.
23. ZIEDES DES PLANTES, B. G. A new method of differentiation in roentgenography (planigraphy). *Acta radiol.*, 1932, 13, 182-191.
24. ZIEDES DES PLANTES, B. G. Planigraphy. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1933, 47, 407-411.
25. ZIEDES DES PLANTES, B. G. A method of obtaining separate pictures of definite parts of objects in roentgenograms. *Nederl. tijdschr. v. geneesk.*, 1934, 78, 762-768.
26. ZIEDES DES PLANTES, B. G. Planigraphy, a method of obtaining a clear image of an object at any desired plane. *J. de radiol. et d'électrol.*, 1934, 18, 73-76.
27. ZIEDES DES PLANTES, B. G. Planigraphy, a roentgenographic differentiation method (Thesis for doctorate degree). Kemink and Son N. V., Utrecht, Netherlands, 1934.
28. ZIEDES DES PLANTES, B. G. Discussion of papers of Ott, Chaoul, and Grossmann. *Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstrahlen*, 1935, 52, 46-49.