

二重光子吸収測定法による腰椎側面像 より得る椎体の骨塩量測定装置の開発

研究課題番号 63480255

平成元年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書

平成2年3月

研究代表者 森田陸司
(滋賀医科大学教授)

二重光子吸収測定法による腰椎側面像 より得る椎体の骨塩量測定装置の開発

研究課題番号 63480255

平成元年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書

平成2年3月

滋賀医科大学附属図書館



1990025342

研究代表者 森田陸司
(滋賀医科大学教授)

はしがき

退行期骨粗鬆症は、骨塩量の減少により易骨折の状態にある疾患である。脊椎骨の骨折は、背部痛に始まり、円背や亀背といった外見的な変化が招じ、ひいては寝た切りの状態へと陥る。また、大腿骨頸部骨折は、歩行不能から寝た切りへと転帰する。社会の高齢化が急速である本邦では退行期骨粗鬆症患者の数が急増し、その診断や治療は医療面のみならず社会的な問題となってきた。骨粗鬆症の成因である骨塩量の減少は、ビタミンDやカルシトニン等のホルモンに主として支配されている骨代謝回転の異常、つまり骨新生と骨吸収のuncouplingによるものとされている¹⁾。このuncouplingは、骨新生の低下もしくは骨吸収の亢進によるものであり、結果として骨塩量の減少をきたす。骨は海綿骨と皮質骨とで構成されているが、骨代謝回転の異常は海綿骨でより早期にしかも著明に生じるとされている。したがって、骨粗鬆症の診断に不可欠な骨塩量の減少をより早期にしかも正確に把握するためには、海綿骨が主体をなす腰椎等の躯幹骨の骨塩定量が望まれる。

骨塩定量法には種々の方法^{2) - 7)} が存するが、測定手技が簡便であ

り、しかも測定精度に優れていることが臨床において不可欠な条件である。dual photon absorptiometry (DPA) はこれらの条件を具備した方法であり、しかも軀幹骨をその測定対象とした骨塩定量法である。DPAによる骨塩定量の主たる測定部位である腰椎は、全体としては海綿骨がその主体をなすが、椎体部で特に海綿骨の占める割合が大きく、関節・突起部では逆に皮質骨の占める割合が大である。したがって、腰椎の椎体部を関節・突起部と分離して定量することが望まれるが、一般には腰椎前後像での骨塩定量が行われており、椎体部と関節・突起部とが重なった状態での骨塩量を得ている。もし腰椎側面の骨塩定量が可能となれば、椎体部と関節・突起部との分離は容易となり、海綿骨が主体をなす椎体部のみの骨塩定量が可能となる。しかし、現在開発・市販されているDPAを応用した骨塩定量装置は、すべて被検者体位は仰臥位であり、しかもスキャナ方式を採用しているため、その機構上腰椎側面の骨塩定量は困難である。

今回我々は、検出器にシンチカメラ方式を採用して、坐位にてデータ収集を行う新方式のDPA装置の開発を発案し、腰椎側面の骨塩定量装置としての検討を試みた。

研究組織

研究代表者：森田陸司（滋賀医科大学 教授）

研究分担者：福永仁夫（川崎医科大学 教授）

研究分担者：大塚信昭（川崎医科大学 講師）

研究経費

昭和63年度 5,600千円

平成元年度 700千円

計 6,300千円

研究発表

(1)学会誌

森田陸司、福永仁夫、大塚信昭：二重光子吸収法による腰椎側

面像より得る椎体の骨塩量測定装置の開発. INNER VISION

4:39-40, 1989

友光達志、福永仁夫、大塚信昭、森田陸司：二重光子吸収測定

法を用いた腰椎側面における骨塩定量の試み. 川崎医学会誌

15:301-310, 1989

(2)学会発表

Rikushi Morita:Bone mineral density assessed by a dual
photon absorptiometric system equipped with a gamma
camera (DUALOMEX HC-1). 5th International Congress
on Bone Morphometry, Niigata, 1988

友光達志、福永仁夫、大塚信昭、森田陸司 :Dual Energy X-ray
Absorptiometry装置 (QDR-1000, Hologic) の基礎的検討.

第9回 骨形態計測研究会、福島、1989

装置の概要

開発したDPA装置の概略をFig. 1に示す。本装置は、線源部、検出器部およびデータ処理部より構成されている。線源部は線源と線源容器からなり、線源には直径3.0mm、容量1.85GBq (50mCi) の¹⁵³Gdが使用されている。なお、線源は容器ごと取り出せる機構となっているため、線源交換は安全かつ容易に行い得る。

検出器部は、焦点型のコリメータ（焦点距離100cm）、検出器および制御部で構成されている。検出器であるシンチレーションカメラは原理的にAnger型であり、検出器本体にはNaI (Tl) シンチレータ（大きさ21.0cm×19.0cm、厚さ0.51cm）と22本の光電子増倍管（直径5.08cm）が使用され、位置計算回路には抵抗マトリックス方式が用いられている。なお、線源と検出器間の距離は100cmであり、カメラの有効視野は12.5cm×15.6cmである。

データ処理部は、処理用コンピュータ、画像表示部およびプリンターで構成され、コンピュータにはパーソナルコンピュータ（PC-9801 UV, NEC）が用いられている。

なお、計測値の校正は、軟部組織としてウレタンを、脊椎骨とし

て炭酸カルシウムとウレタンの混合物を使用したDPAファントム (20cm×15cm×20cm、京都科学標本) を用いて行った。さらに、開発したDPA装置で得られた計測値は、すでに校正のなされているSPA装置 (Bone Densitometer Model 2780, Norland) における計測値を基準として行った。

I. 基礎的検討

1. 検出器の基本性能

われわれの装置では検出器がシンチカメラであるので、基本性能の評価をシンチカメラの性能試験法であるNEMA規格⁸⁾ に準じて行った。つまり、固有分解能、視野の均一性、計数率特性の各項目について検討した。

装置の固有分解能の検討は、0.35mmのスリットを有する厚さ10mmの鉛板を用い、マルチチャンネルアナライザー (Series 20, Canberra) 上の半値幅 (FWHM) にて評価した。視野の均一性は、コンピュータにて均一補正後、有効視野の80%領域についてカウント数の最大偏差を求めて行った。計数率特性は、吸収体として厚さ1mmの銅板を用いて行った。なお、固有分解能と計数率特性の検討の場合は装置本体の線源を (1.85G bq, 50mCi)、均一性の場合は直径3mmの¹⁵³Gdの密封線源 (1.85M bq, 50 μ Ci) を使用した。

2. DPA装置としての基礎的検討

シンチレーションカメラ型DPA装置による腰椎側面の骨塩定量を行うには、二つの問題点が存する。すなわち、その一つは、面型検出器を有するシンチレーションカメラ型装置では直接線が検出器に入射すること、二つ目は、前後像に比して被検者体厚が増加するため、計数率が低下することである。また、線源強度を増加させて高計数率にすると、たとえ吸収体が存在しても、先に挙げた直接線が入射した場合と同様の問題が生じる。本研究では、腰椎側面の骨塩定量装置の開発を目的として、これらの基礎的な事項について検討した。

1) 高計数率の問題

放射線が被検者の背部を減弱されることなく通過して検出器に入射した場合、あるいは線源強度が増加したことによって惹起される問題点としては、計数の数え落とし、pile-upおよびmisplaced event count rateなどが考えられる。計数の数え落としの検討は、先に示した計数率特性を検討することによってなされる。pile-upの検討は、吸収体が存在しない状態における4種の計数率（2M, 60k, 18k, 8k count per second, cps）のエネルギー信号をマルチチャンネルアナ

ライザー上に取り出し、その波形を視認することによって行った。

misplaced event count rateの検討については文献的考察によった。さらに、直接線の検出器への入射を防ぐ目的のために、背部体厚補償フィルタの作製とその検討を行った。体厚補償フィルタは、前後体厚20cmおよび28cmの標準体型について作製した。作製方法は、まず側面での各部位の体厚を計測後、ついで体厚の差を補償するアクリル厚を算出し、体厚補償フィルタを作製した。なお、アクリル厚は、軟部組織とアクリルの線減弱係数から算出した。

2) 被検者体厚増加に伴う問題

線源に ^{153}Gd を用いたDPA装置ではbeam hardeningやspill-overといった問題が生じることが知られている。 ^{153}Gd から放出される光子には103keVと97keVの γ 線と41~47keVのEuropiumの特性X線があり、シンチレータを検出器に使用した装置ではそのエネルギー分解能から、これらの光子は100keVと44keVとの二つの光電ピークとして認められる (Fig. 2)。しかし、体厚の増加に伴い各々のピークの低エネルギー成分側の吸収が高エネルギー側の成分に比して大となり、結果として連続スペクトルを有する白色X線と同様にbeam hardeningがみら

れる。また、spill-overは、2種以上の光子を放出する放射線では、高エネルギー側の散乱線が低エネルギー側に混入する現象であり、これも ^{153}Gd を用いたDPA装置では避けることのできない問題である。しかも、これらの影響は吸収体が増加するほど、つまり前後像よりも側面像においてその影響が大きい。また、Fig. 3に種々の厚さの吸収体（15cm, 20cm, 25cm, 35cmの水ファントム）における ^{153}Gd のエネルギースペクトルを示すが、このように体厚の増加に伴って放射線の減弱は顕著であり、計測時間にも依存するが、エネルギー信号の検出の困難さが認められる。すなわち、体厚の増加に伴って検出能が低下してくる。したがって、ここでは側面像に由来する体厚増加の影響をみるため、beam hardening、spill-over、至適計測時間および体厚と検出能との関係について検討を行った。

beam hardeningとspill-overの検討は、吸収体として水ファントム（大きさ30cm×30cm、厚さ2～40cm）を、計数器としてマルチチャンネルアナライザーを用いて行い、44keVと100keV各々のカウント数を計測することによって行った。この実験における44keVと100keVのエネルギーウインド幅は各々±30%と±15%である。spill-overの検討では、上記の条件に加え、44keVのエネルギー信号を消去する目的

で3mm厚の銅フィルタを線源部に装着して検討に供した。

至適計測時間の検討には、前述のDPAファントムを測定対象として用い、種々の計測時間 (2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0分) で測定を行った。検出能の検討には、直径4cmの円柱ファントムに骨塩該当物質として種々の濃度の第2リン酸カリウム溶液 (K_2HPO_4 , 500, 250, 125, 62.5mg/cm³) を封入し、さらにそれを水ファントム (30cm×30cm×20cm) の中に設置したものを測定対象として用い、計測時間は15分で測定した。両検討共にファントムの厚さについては、20cmの他に水ファントムを付加した25cmおよび30cmについても検討を行った。その評価は、至適計測時間についてはデータ処理後得られるbone mineral density (BMD) 値の変動係数 (coefficient of variation, CV) で評価を行い、検出能については得られるイメージ上で円柱ファントムが視認され、かつ正しく骨塩量 (bone mineral content, BMC) が計算されたものを検出可能とした。

3) 腰椎側面像の画像処理の検討

腰椎側面の骨塩定量では前述の如く検出能の低下が予想されるため、椎体の輪郭の描出が困難となる。そこで、検出能の向上と正確

な骨塩定量を目的として、画像処理に画像改善フィルタを使用して輪郭の描出能の改善を試みた。

検討方法は、前述のDPAファントムを15分計測して得られたデータを、①画像処理なし、②画像改善フィルタとして9点荷重smoothingを用いたもの、および③Vフィルタを用いたものの3種類のデータについて比較することによった。これらのデータ処理には、コンピュータとしてパーソナルコンピュータ（PC-9801 RA-5, NEC）を用いた。

II. 臨床的検討

臨床的検討として、腰椎側面における骨塩量の測定精度および関節・突起部と椎体部との骨塩量比について検討した。測定精度の検討は、健常男性1例（年齢39歳）と人体腰部ファントム（京都科学標本）とを測定対象として、週1回延べ5回の計測を行い、得られたBMD値の日差再現性で検討した。関節・突起部と椎体部との骨塩量比の検討は、若年健常男性10例（年齢22～39歳）と高齢健常女性3例（55～74歳）を測定対象に用いて行い、各々の関節・突起部と椎体部の骨塩量比を求め、若年者と高齢者の比較を行った。なお、検討対象部

位は第3腰椎で、測定時間は15分であり、測定体位の位置決めにはレーザービームポインタを用いて正確に行った。さらに、高精度の骨塩定量が可能とされている、線源にX線を用いたdual energy X-ray absorptiometry (DEXA) 装置 (QDR-1000, Hologic) を用いて、同様の検討を行い、比較検討した。なお、測定対象としては、測定精度の検討には若年健常男性1例 (年齢21歳) と人体腰部ファントムとを、骨塩量比の検討には若年健常男性4例 (年齢20～39歳) を用いた。またDEXAでは、健常者78例 (男性61例 : 年齢35～83歳、女性17例 : 年齢41～71歳) を測定対象として測定を行い、前後像におけるBMD値と側面像における椎体部のBMD値との関係について検討した。

結果

I. 基礎的検討

1. 検出器の基本性能

基本性能の検討の結果をTable 1に示す。FWHMで検討した固有分解能は、44keVでは6.9mmであり、100keVのそれは4.2mmであった。視野均一性は、44keVでは5%以下であり、100keVでは3%以下であった。また、計数の分解時間は1.39 μ secであり、最大計数率は200kcpsであった。計数率特性については、放射線強度と計数率との間に35kcps以下で直線性が得られた (Fig. 4)。これらの結果は、市販されているシンチカメラの性能と同等であることが示された。

2. DPA装置としての基礎的検討

1) 高計数率の問題

計数の数え落しは、先に得られた計数率の直線性より、35kcpsを超えると生じることが認められた。エネルギースペクトルで評価した pile-upは、計数率の増加に伴って増加し、60kcpsでは光電ピークの下方向へのシフトが認められた。さらに、2Mcpsでは¹⁵³Gdの光電ピーク

が確認できないことが示された (Fig. 5)。この結果は、高計数率になるほど計数の数え落しばかりでなく、pile-upの影響が大きいことを示している。

直接線の入射を防ぐ目的で作製された体厚補償フィルタは、全長22.0cm、幅5.0cmであり、厚さ5mmの台座に種々の長さの亚克力 (0.75~21.5cm) を付加したステップ状のウエッジ型である (Fig. 6)。

この体厚補償フィルタを用いて、直接線が検出器に入射する被検者背部の計数率の変動の成績をFig. 7に示す。フィルタを使用することにより、検出器の視野内はほぼ均一な計数率が得られ、側面体厚の補正が可能となった。

2) 被検者体厚増加に伴う問題

beam hardeningとspill-overの検討結果をFig. 8に示す。縦軸を片対数にとると、放射線の減弱は理論上破線で示すように直線となる。したがって、beam hardeningは、実測値が破線から分離する点の体厚から出現すると考えられる。つまり、44keVでは25cm体厚から、100keVでは30cm体厚付近から認められた。他方、spill-overに関しては、その絶対値は体厚約5cmをピークとして、厚さが増すほど減少

したが、100keVの計数値を基準にした相対値では逆に増加が認められた。

至適計測時間の検討の結果は、計測時間が長いほどBMD値のCVが低値をとり、計測時間15分では腰椎側面の体厚に相当する30cm体厚においてBMD値のCVは約1.5%以下であった (Fig. 9)。

計測時間15分で行った体厚と検出能との関係をTable 2に示す。前後像に相当する20cm体厚では第2リン酸カリウム溶液の濃度62.5mg/cm³まで検出可能であったが、側面像に相当する30cm体厚では125mg/cm³以下の濃度は検出できなかった。

3) 腰椎側面像の画像処理の検討

画像改善フィルタを用いて、計測によって得られたBMCのprofile curveを対象として画像改善の検討を行った。フィルタなしに比して、9点荷重smoothingおよびVフィルタではともに画像の改善が認められた (Fig. 10)。特に、Vフィルタを用いた画像では他に比して輪郭が明瞭であった。腰椎側面の臨床データを用いて、9点荷重smoothingとVフィルタにて画像処理を行った結果をFig. 11に示す。臨床データでは、ファントムにおいて得られた結果ほどに、両デー

夕処理法の間には明らかな差は認められなかった。

II. 臨床的検討

人体の腰椎側面像における骨塩量の測定精度は、DPA装置ではCVで評価した日差再現性が10.24%であり、他方DEXA装置ではCVが6.04%であった。前後像における骨塩量測定の精度はそれぞれ3.54%と1.84%であり、側面像での測定精度の低下が認められた (Table 3)。また、人体腰部ファントム実験において、DPA装置では像の拡大と画像の劣化により定量が不能であったが、DEXA装置では定量が可能でありCV6.52%の日差再現性が得られた。

椎体部と関節・突起部との骨塩量の比は、若年者が1.254であるのに対し、高齢者では1.557であり、両者の間に有意差 ($p < 0.02$) が認められた。一方、DEXA装置で測定された若年者の両部位の骨塩量比は1.528であり、DPA装置における若年健常者のそれとは明らかに異なった値を示した (Table 4)。

DEXA装置を用いて測定した前後像のBMD値 (A) と椎体部のBMD値 (L) について、両者の比 (L/A) をとり、性差が影響するか否かを検討した。L/A値は、男性例では 0.807 ± 0.115 であったのに対し、女性

例では 0.683 ± 0.148 であり、両者の間に有意差 ($p < 0.001$) が認められた。ここで、検討対象の男女の年齢 (男性 48.6 ± 10.4 歳、女性 51.8 ± 10.1 歳) には有意差はみられなかった。

BMD値の比であるL/A値と、前後像における測定値の最大骨量よりの偏差を示すT scoreとの関係をFig. 12に示す。T scoreが0以下の値を示した64例 (男性50例、女性14例) を対象にすると、T score (x) とL/A (y) との間には有意な正の相関性が認められた ($y = 0.038x + 0.854$, $r = 0.440$, $p < 0.001$)。

考 察

カメラ方式によるDPA装置の基本性能のうち、均一性については骨塩量の計算を行うのに必要な入射放射線強度 I_0 を有効視野内で一定の値を採用する場合に問題となり、分解能については44keVと100keVの位置分解能の違いが問題となる。均一性は、本装置では I_0 を視野内の各点について求める方式を採用しているため、計算値の精度に影響を及ぼさない。一方、位置分解能の違いが計算値に及ぼす影響については詳細が不明であり、今後検討を加える必要があると考える。

また、計数率特性についてはBMCの計算を行うためには、計数の数え落しのない範囲（本装置では35kcps以下）で使用する必要がある。そして、数え落しのない最大計数率は、DPA装置のように有効視野に対して均一強度で照射されている場合、視野の大きさと無関係にほぼ一定の値をとる。したがって、単位面積当りの計数率は、カメラ方式より有効視野が大変小さいスキャナ方式の方が大きな値を獲得できる。しかも、この単位面積当りに得られるカウント数は、計算値の精度に大きく関与する。この点に関しては、カメラ方式は不利

であるが、スキャナ方式も定量範囲を測定するのに長時間を要する必要がある。これらを総合すると、理論上、同じ計算精度を得るための計測時間は、カメラ方式でもスキャナ方式でも差がないと推測される。さらに、腰椎側面における骨塩定量を考える場合、カメラ方式のDPA装置の方が位置決めおよび体位保持が簡便であり、スキャナ方式よりも優れていると思われる。

腰椎側面の骨塩定量に伴う高計数率の影響の検討として、基本性能で検討した計数率特性の他に、pile-upおよびmisplaced event count rateについて検討を行った。pile-upは、18kcpsではその影響が殆んど認められなかった。他方、misplaced event count rateは、線源として $^{99m}\text{TcO}_4^-$ を用いた報告⁹⁾によると、体厚5cmまでは増加してそれ以後は一定もしくは低下するといわれている。しかも、その発生率は高計数率の場合に限られており、その割合は最大でも数%としている。したがって、計数率の直線性が得られる範囲であれば、計数の数え落し、pile-upおよびmisplaced event count rateなどはみられず、正しくカウントされていることになる。また、今回作製した背部の体厚補償フィルタを用いることにより、視野内はほぼ均一の計数率が得られた。したがって、体厚補償フィルタを使用すれば、

高計数率に起因する問題は生じないことになる。しかし、計測時間の短縮や測定精度の向上を目的として線源強度を増加させると、再び高計数率の問題が生じてくる。つまり、高計数率の問題が生じない範囲での最大線源強度は、体厚補償フィルタの使用時の計数率が15kcpsであることを考慮すると、現在の線源強度1.85GBq (50mCi) の約2倍の3.7GBq (100mCi) 程度と考えられた。

DPAでは、2種類のエネルギーにおける軟部組織と骨の質量減弱係数の値が測定原理上必須である。したがって、beam hardeningによって実効エネルギーが変化すると、それに伴って減弱係数を変える必要がある。今回の検討では、44keVにおける¹⁵³Gdのbeam hardeningは約25cm体厚付近から観察された。これは、体厚25cm以下と考えられる腰椎前後方向の骨塩定量では、beam hardeningを殆んど考慮する必要がなく、他方25cm体厚を超えると考えられる腰椎側面の骨塩定量ではその補正が必要であることを意味している。しかし、体厚に応じて減弱係数を変えていく方法は、視野内の各部位で行う必要があり、面型検出器を有するシンチレーションカメラ型DPA装置では不可能である。このことが腰椎側面における骨塩定量の測定精度が低下する要因の一つと考えられた。一方、spill-overは我々の施設

が報告¹⁰⁾ しているように体厚に応じてその量をあらかじめ求めておけば、その補正は可能となる。しかし、いかなる補正にも誤差が伴うものであり、spill-overの補正も例外ではなく、補正を行っても測定精度のある程度は低下をきたすと考えられた。

腰椎側面像では描出能が低下しているが、その画像改善を目的として、ファントムデータにより基礎的検討を行い、臨床に応用した。ファントムデータでは画像改善フィルタとしてVフィルタを用いた場合が、他に比して明らかに輪郭の描出能が優れていた。しかし、臨床に応用すると、9点荷重smoothingで処理した画像と大差のない結果が得られた。これは、ファントム実験に用いた体厚(20cm)と臨床検討での被検者体厚(28cm)が大きく異なっていたことに起因すると考えられた。つまり、20cm体厚ではVフィルタを使用することによって輪郭強調効果が得られたが、28cm体厚ではノイズレベルの増加によってVフィルタによる効果が相殺されるためと考えられる。したがって、計測時間の延長(現在の計測時間の $10^3 \sim 10^5$ 倍程度)等によって相対的なシグナルレベルの増加をもたらす以外には画像改善が望めないことが確認された。

臨床的検討として行った腰椎側面像における骨塩量測定の精度

は、前述した基礎的検討で指摘された種々の影響を反映して、DPA装置での精度はDEXA装置でのそれに比して明らかに劣っていた。特に人体腰部ファントムを測定対象としたときにはDPA装置では腰椎部の骨塩量の測定は不能であった。これは、ファントム中の椎体骨は乾燥骨よりなっており、そのため生体の椎体骨に比して放射線の減弱が少なく、特に海綿骨の豊富な椎体部でその影響が大きいことによるものと考えられた。またDPA装置とDEXA装置を用いて取得した腰椎側面の骨塩イメージでも、DEXA装置の方がDPA装置よりも椎体の描出能が優れていた (Fig. 13)。

X線を線源としたDEXA装置の骨塩測定能がDPA装置よりも優れていた理由として、二つの要因が考えられる。一つは、X線を線源としたことによって単位時間当りの光子数が飛躍的に増加したことであり、二つ目には、2種類のエネルギーのX線が同時ではなく別個に検出されていることである。光子数の増加は、X線を線源としたことに起因するものであり、これらはラジオアイソトープに換算すると現在DPA装置に使用されている $10^3 \sim 10^5$ 倍程度の線源を使用したのと匹敵する。線源強度の増加に際してみられる種々の問題点は、DEXA装置であるQDR-1000においては検出器がスキャナ方式であることと、計

数方法として放射線を光子数ではなく線量として捉えることによって解決がなされている。また、spill-overは2種類のエネルギーを時間的に切り替えて放出し、それを各々別個に検出することによって解決されている。X線装置で特に問題となるbeam hardeningについては、本DEXA装置ではすべてのDPA装置とも骨塩量計算方法が異なっており、独特の方法でbeam hardeningの問題が解決されている。この処理法を含め、前述のDEXA装置の機能は、 ^{153}Gd を線源としたシンチレーションカメラ型のDPA装置には適用できないものである。しかし、DEXA装置を用いた腰椎側面における骨塩定量にも問題点が存する。それは、体厚の増加に伴う検出能の低下と測定体位の再現性の低下の問題である。体厚の増加に伴う検出能の低下は、いかなる装置を使用しても付随するものであり、画期的な測定法でも開発されない限り、DPAの測定原理を応用した装置では解決不可能な問題である。他方、測定体位の再現性の低下は、DEXA装置がスキャナ方式を採用しているため、測定体位が側臥位であることに起因するものである。第1～第4腰椎の上下方向は、胸椎が肋骨で固定され、第5腰椎が骨盤骨で固定されているのに対して、前後および左右方向に可動する。つまり、側臥位では第1～第4腰椎は、背腹方向と体側方向の両方

向の動きが連動して三次元的な動きを呈する。このため、側臥位における骨塩定量の体位の再現性は極めて不良のものとなる。したがって、測定精度の向上のためには、側臥位における体位保持機構の開発もしくは体位の安定した仰臥位での定量の可能な装置の開発が望まれる。

臨床的検討として行ったDPA装置による椎体部に対する関節・突起部の骨塩量比は若年者が1.254であるのに対して高齢者では1.557であり、加齢による骨塩量の低下は椎体部で著しいことが示唆された。しかし、椎体部のみの定量を目的とする腰椎側面における骨塩定量は、原理的には優れているものの、椎体部の骨塩量は関節・突起部のその6～8割程度であるために、その測定精度は期待できない。また、若年者を測定対象に用いたとき、DPA装置ではその骨塩量の比が1.254であったのに対してDEXA装置では1.528であり、両者の間に差異が認められた。この原因は明らかではないが、両装置の測定精度を考慮するとDEXA装置で得られた値がより真実に近いと推測された。

側面像での椎体部と前面像でのBMD値の比であるL/Aの値は、男性例よりも女性例の方が低値を示し、両者の間には有意差が認められ

た。これは、女性例では腰椎全体の骨塩量に占める海綿骨の骨塩量の割合が男性例に比して低いことを示している。また、L/AとT scoreとの間に有意の相関性が認められたことから、今回の対象年齢では、骨塩量の減少は皮質骨よりも海綿骨においてより顕著であることが示唆された。これらにより、中年期における骨塩量の減少は主に海綿骨に生じ、女性の方が男性よりも顕著であることが推察された。

腰椎側面における骨塩定量は、前述したように海綿骨が主体をなす椎体部のみを分離して測定できる利点の他に、高齢者ではしばしばみられる大動脈の石灰化部を前後像とは異なり分離して測定できる利点がある。このように、腰椎側面における骨塩定量の有用性は疑う余地のないものではあるが、その測定精度に問題が存する。つまり、臨床レベルでは5%の骨塩量の変化が治療効果の判定や経過観察に重要であるといわれているのに対して、現時点では測定精度が十分でない。特に、¹⁵³Gdを線源に用いたDPA装置では、その測定原理から考えて、腰椎側面における骨塩定量を実用化することは不可能と思われた。他方、X線を線源に用いたDEXA装置では、その可能性は残されているものの、臨床応用にはsoft ware, hard ware両面の改良

もしくは開発が不可欠であり、今後更なる検討が望まれる。

まとめ

今回、 ^{153}Gd を線源としたシンチレーションカメラ型のDPA装置を開発し、腰椎側面における骨塩定量の可能性を検討した結果、その実現はきわめて難しいことが示された。特に、線源である ^{153}Gd 、検出器であるシンチレーションカメラおよび被検者体厚の増加といった定量の根本的な事項に起因するものであるため、その実現は困難であると思われた。他方、X線を線源としたDEXA装置では、被検者体厚の問題以外は解決されており実現の可能性はあるものの、測定体位の再現性の問題等を含めて今後引き続き検討する必要性が認められた。

文献

- 1) Meunie PJ : Assessment of bone turn over by histomorphometry in osteoporosis. In Osteoporosis: Etiology, Diagnosis, and Management, Riggs, B. L. & Melton, III. L. J. eds, pp. 317-332, Raven Press, New York, 1988

- 2) 齊藤宏、中村隆一 : X線写真からの定量法 - Microdensitometer による - . 日整外会誌 48:479-486, 1974

- 3) Cameron, J. R. and Sorenson, J. : Measurement of bone mineral in vivo: An improved method. Science 142:230-232, 1963

- 4) 福永仁夫、大塚信昭、曾根照喜、他 : 脊椎骨phantomを併用した CT scanによる第3腰椎海綿骨の骨塩定量法. 日医放会誌 46:659-664, 1986

- 5) Dunn, W. L., Wahner, H. W. and Riggs, B. L. : Measurement of bone mineral content in human vertebra and hip by dual photon absorptiometry. Radiology 136:485-487, 1980
- 6) 友光達志、福永仁夫、大塚信昭、他 : ガンマ・カメラによる Dual Photon Absorptiometry装置の開発. 核医学 23:499-503, 1986
- 7) 福永仁夫、大塚信昭、小野志磨人、他 : 健常者におけるDual Photon Absorptiometryによる第3腰椎のBone Mineral Densityの定量. 核医学 24:469-473, 1987
- 8) NEMA Nuclear Section : NEMA standard publication for performance measurement of scintillation cameras. NU 1:1-19, 1980
- 9) 柳元真一、友光達志、村中 明、他 : シンチレーションカメラにおけるmisplaced event count rateの検討. 川崎医学会誌 10 :

393-397, 1984

- 10) 友光達志、柳元真一、成広直正、他 : Dual Photon Absorptio-
metry (DPA) 装置における spill-over 効果の補正. 日放技学誌
43:667-671, 1987

Table 1 DPA装置の基本性能

Intrinsic spatial resolution(FWHM)		
	44keV	6.9mm
	100keV	4.2mm
Intrinsic flood field uniformity		
	44keV	<5%
	100keV	<3%
Count rate performance		
	resolution time	1.39 μ sec
	maximum count rate	200kcps

Table 2 骨塩該当物質 (K_2HPO_4 溶液) 濃度とファントム厚
から評価したDPA装置の検出能

K_2HPO_4 (mg/cm^3)	Phantom Thickness (cm)		
	20	25	30
Measured BMC (g/cm)			
500	6.074	5.838	6.245
250	3.121	2.918	2.893
125	1.483	1.274	—
62.5	0.704	—	—

Table 3 DPA装置とDEXA装置における測定精度

	Projection	
	Lateral	Anteroposterior
DUALOMEX HC-1	10.24%	3.54%
QDR-1000	6.04%	1.84%

assessed by C. V.

Table 4 椎体部と関節・突起部の骨塩量の比較

System	Subject	N	Body (A) (g/cm ²)	J & P (B)* (g/cm ²)	Ratio (B/A)
DUALOMEX	Young Male	10	0.624	0.767	1.254**
HC-1	Aged Female	3	0.404	0.628	1.557**
QDR-1000	Young Male	4	0.941	1.441	1.528

*J & P: Joint and Process, **P<0.02

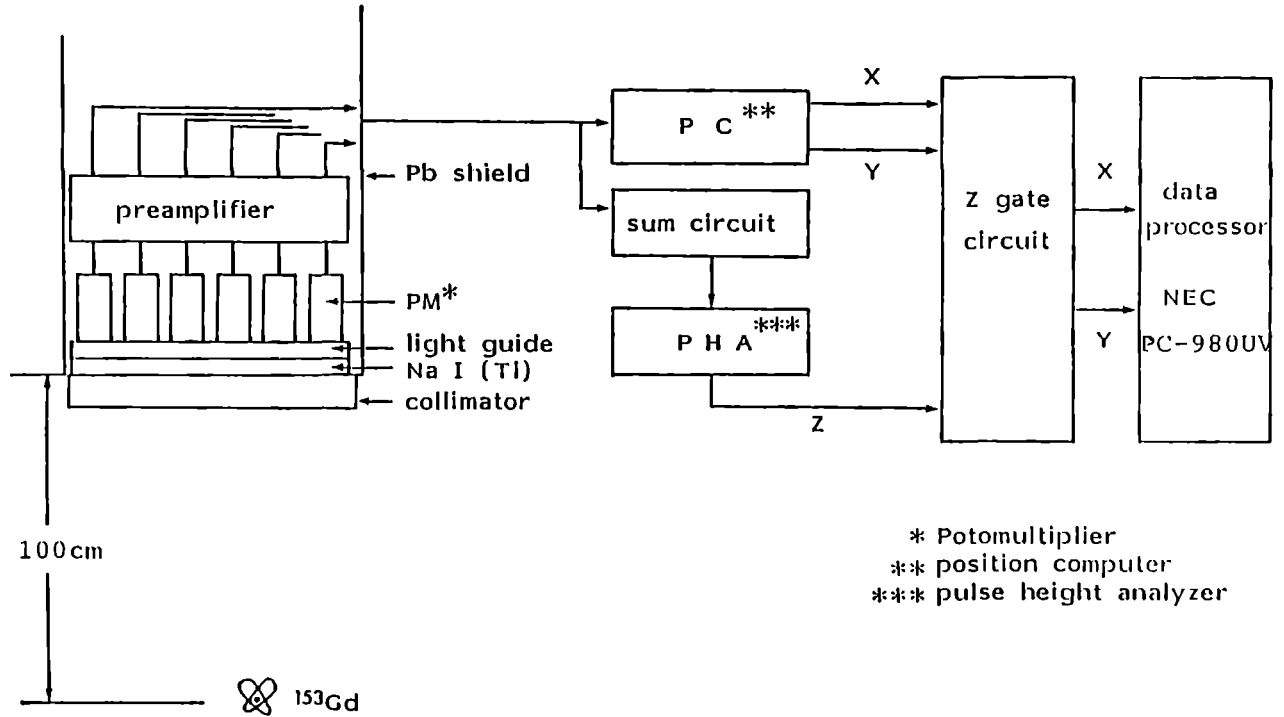


Fig. 1 DPA装置のブロックダイアグラム

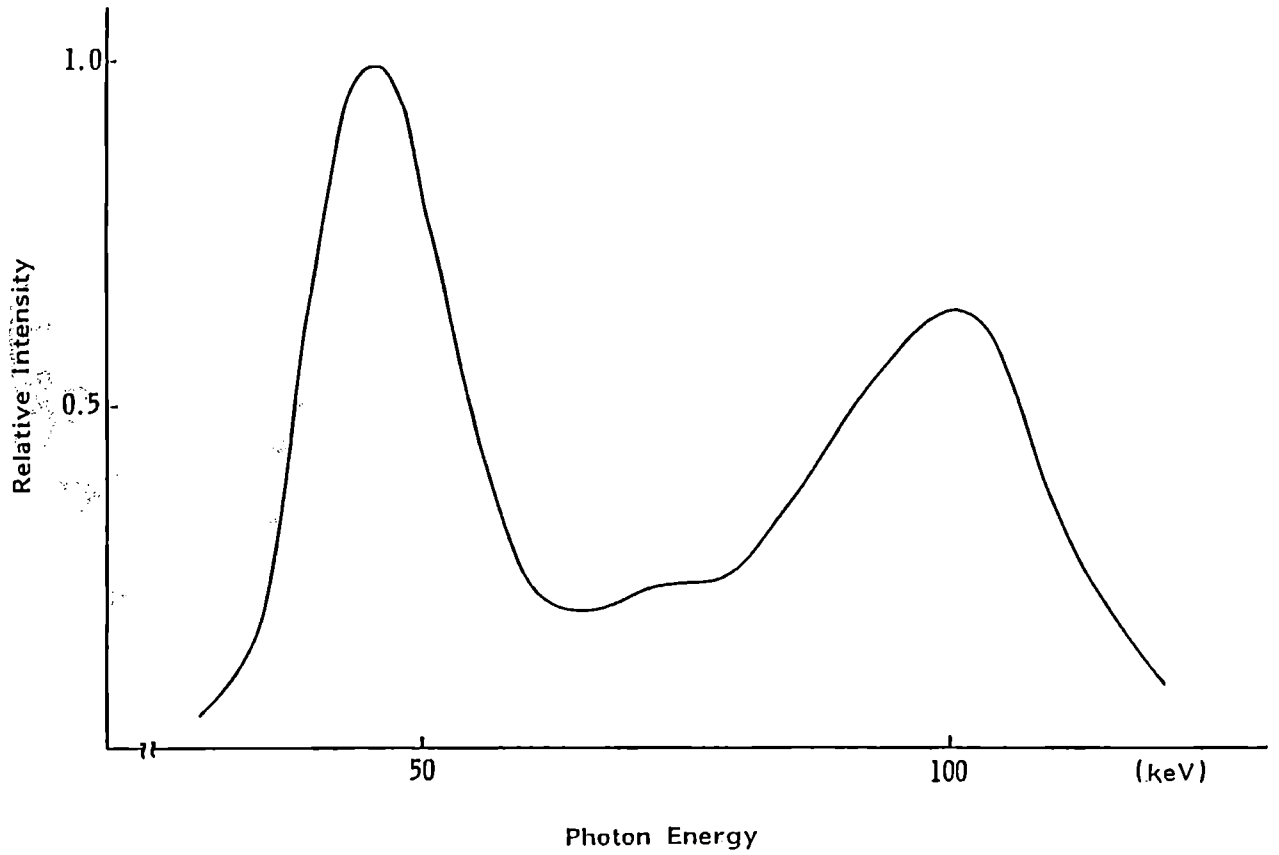


Fig. 2 ^{153}Gd の光子スペクトル

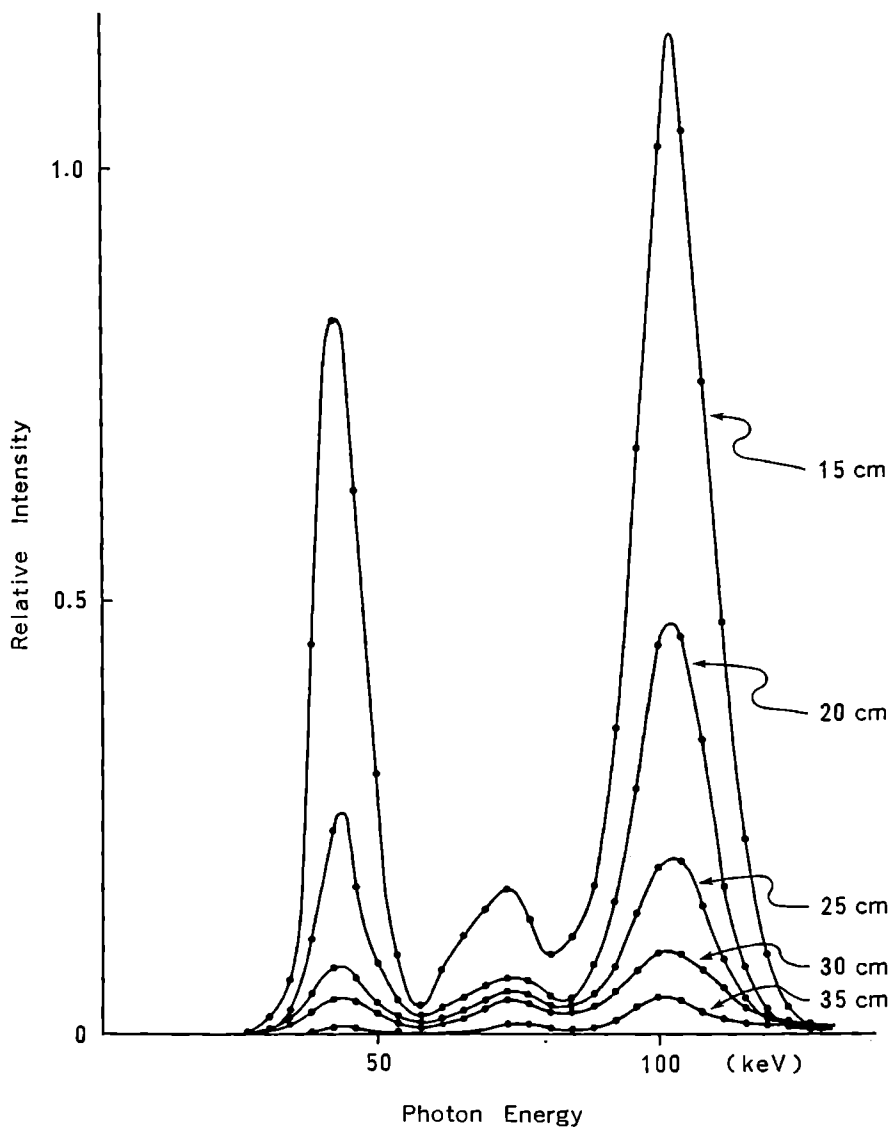


Fig. 3 種々の厚さの水ファントム透過後における¹⁵³Gdのスペクトル

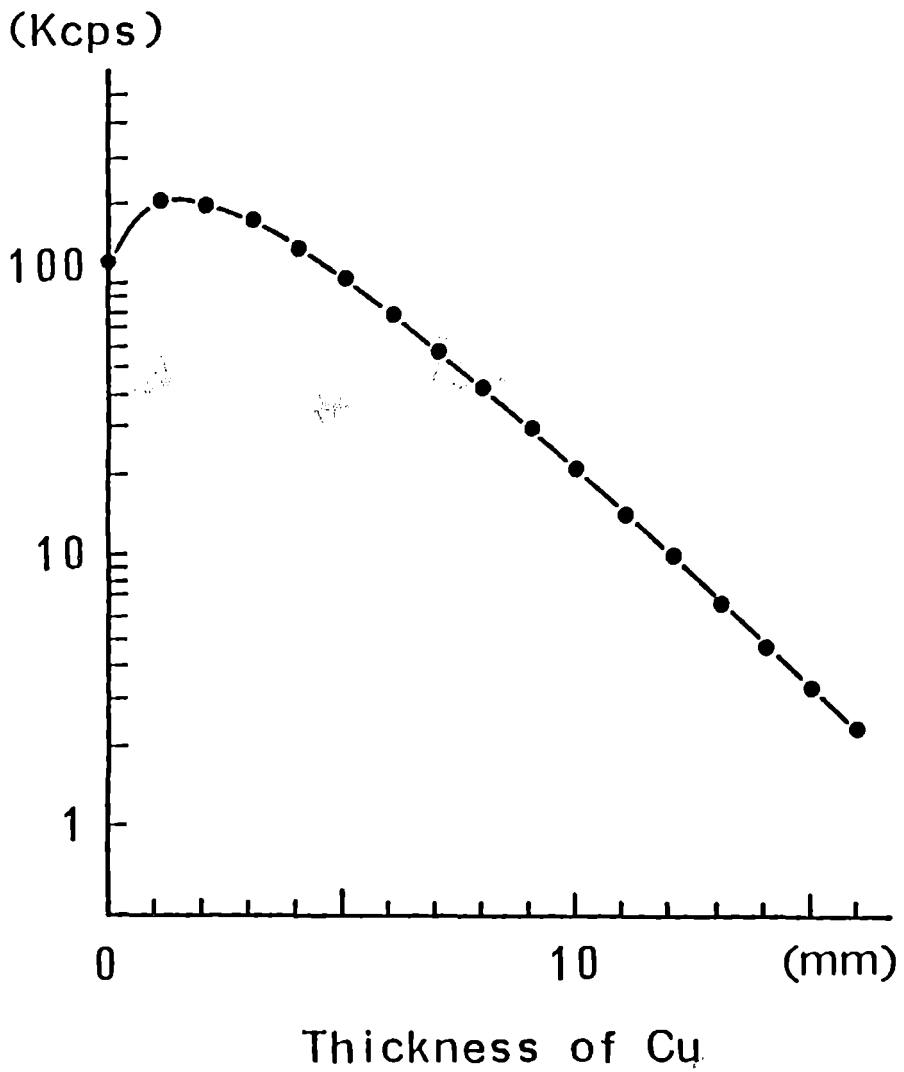


Fig. 4 DNA装置の計数率特性

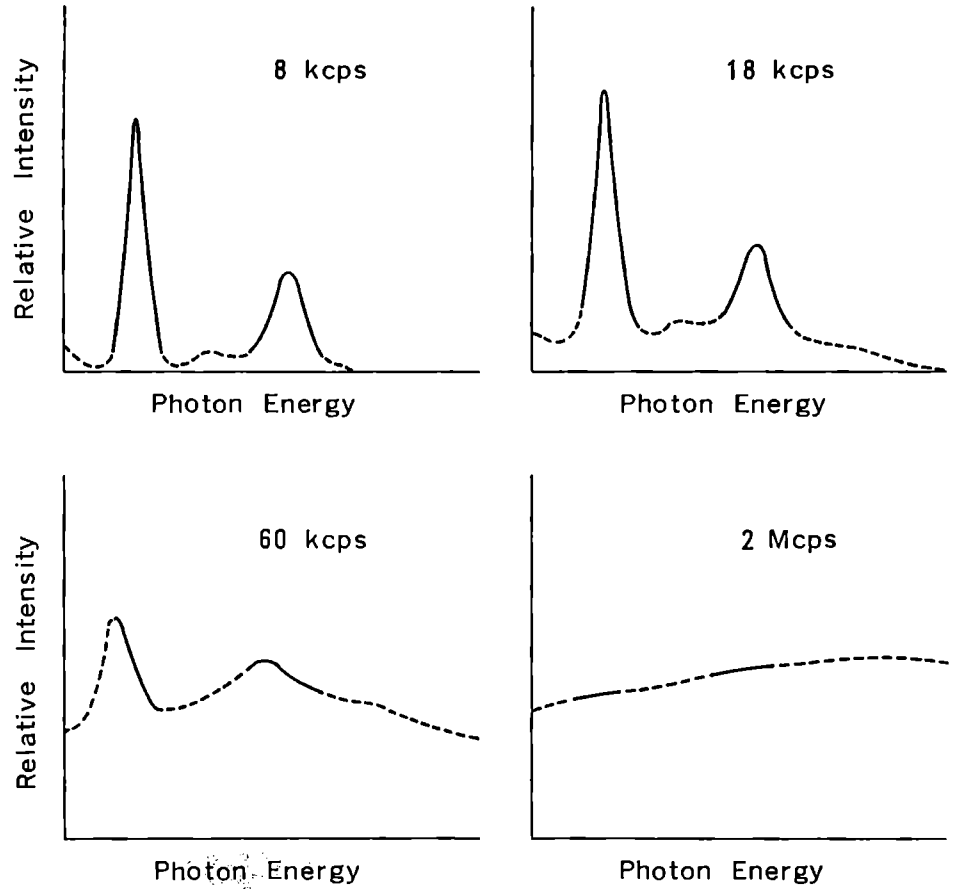


Fig. 5 種々の計数率における ^{153}Gd のスペクトル

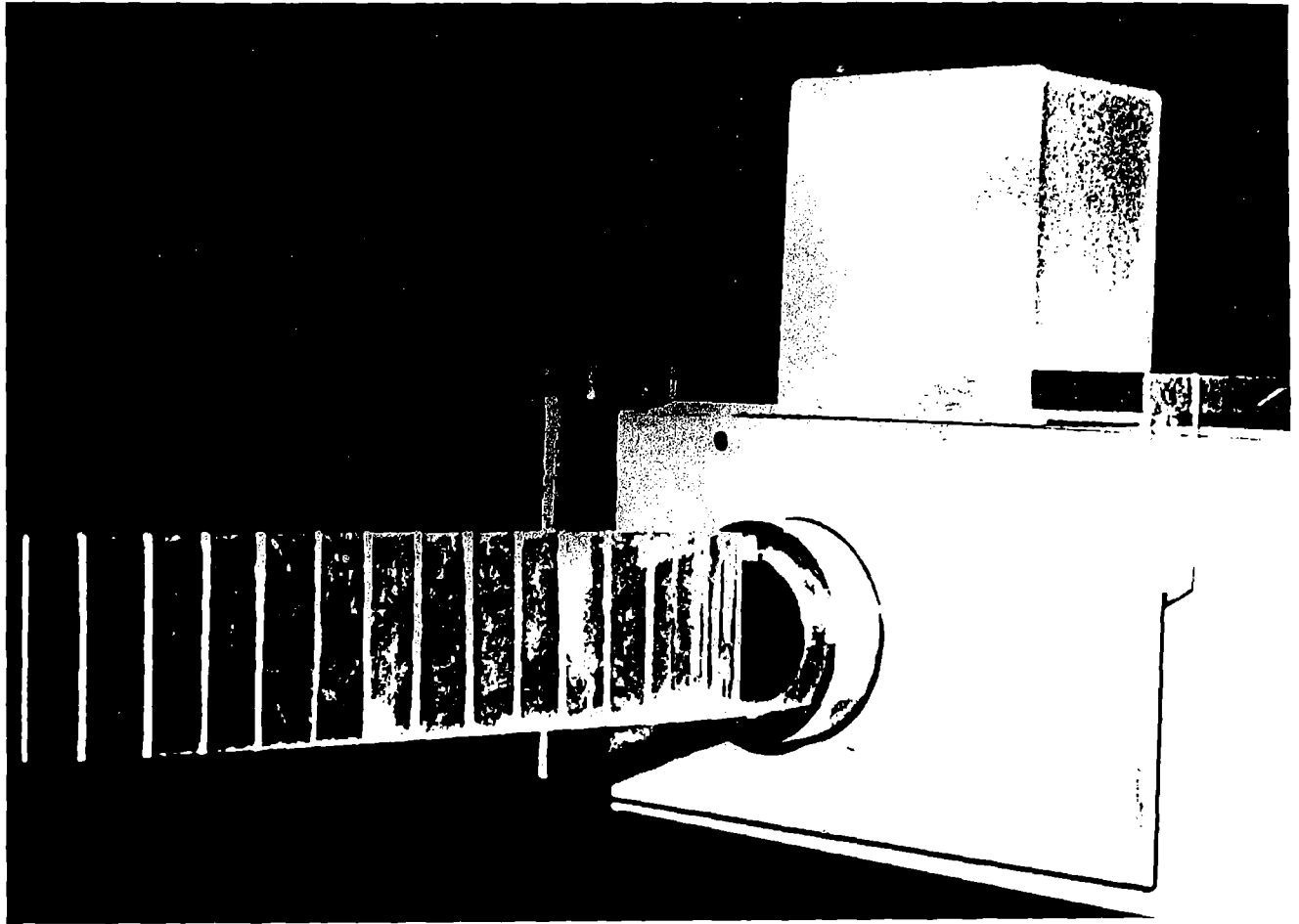


Fig. 6 DPA装置の線源部に装着された体厚補償フィルタ

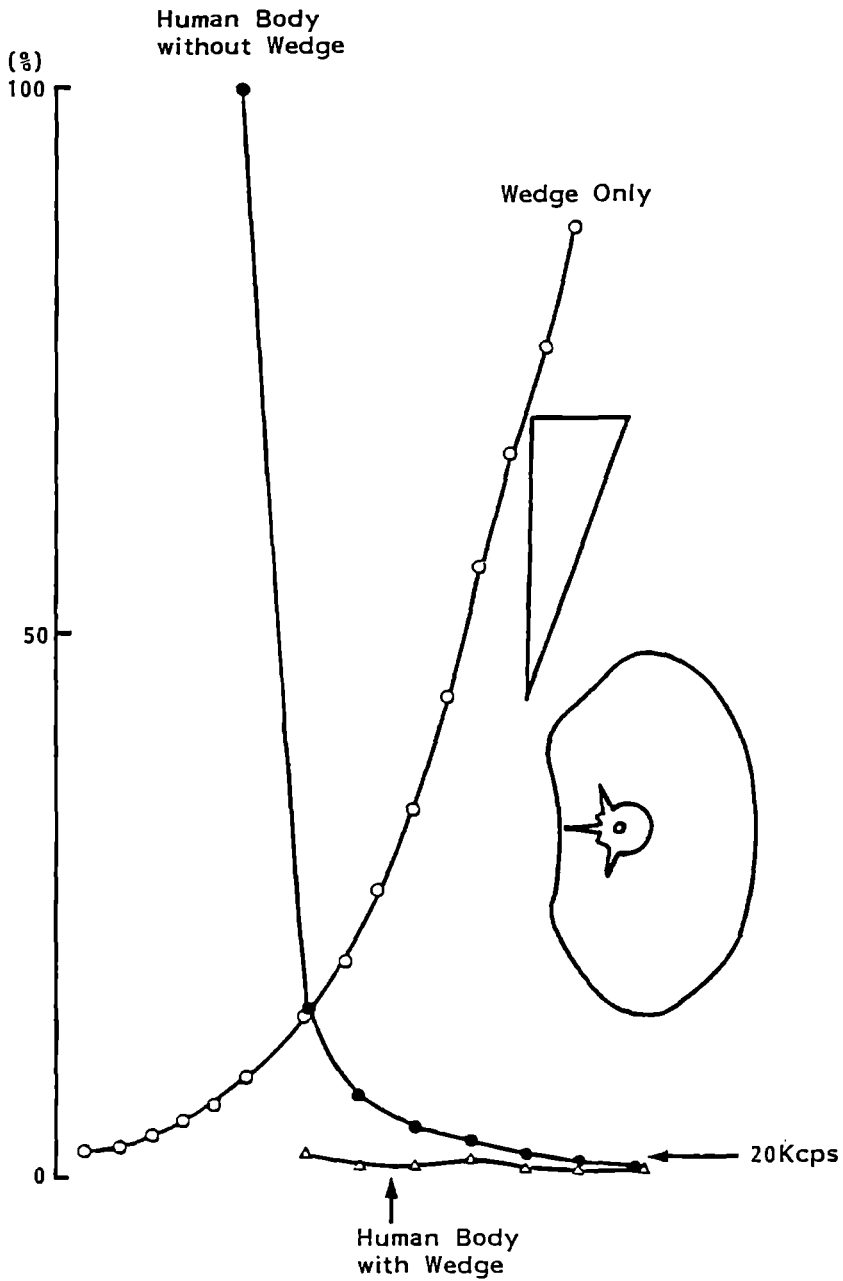


Fig. 7 腰椎側面における相対的な計数率
 ● : 補償フィルタのみ, ○ : 腰椎側面, 補償フィルタなし,
 △ : 腰椎側面, 補償フィルタあり

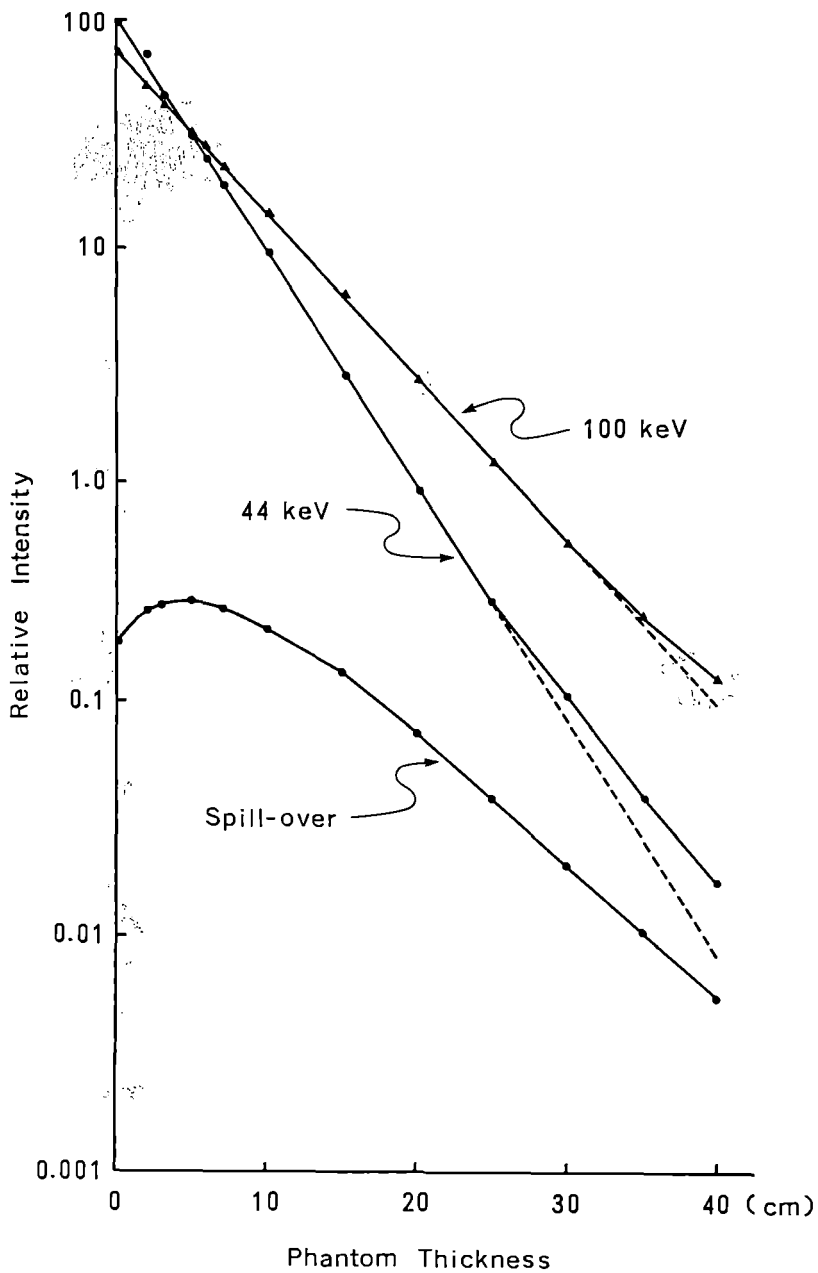


Fig. 8 44keV光子と100keV光子の減弱およびspill-over効果

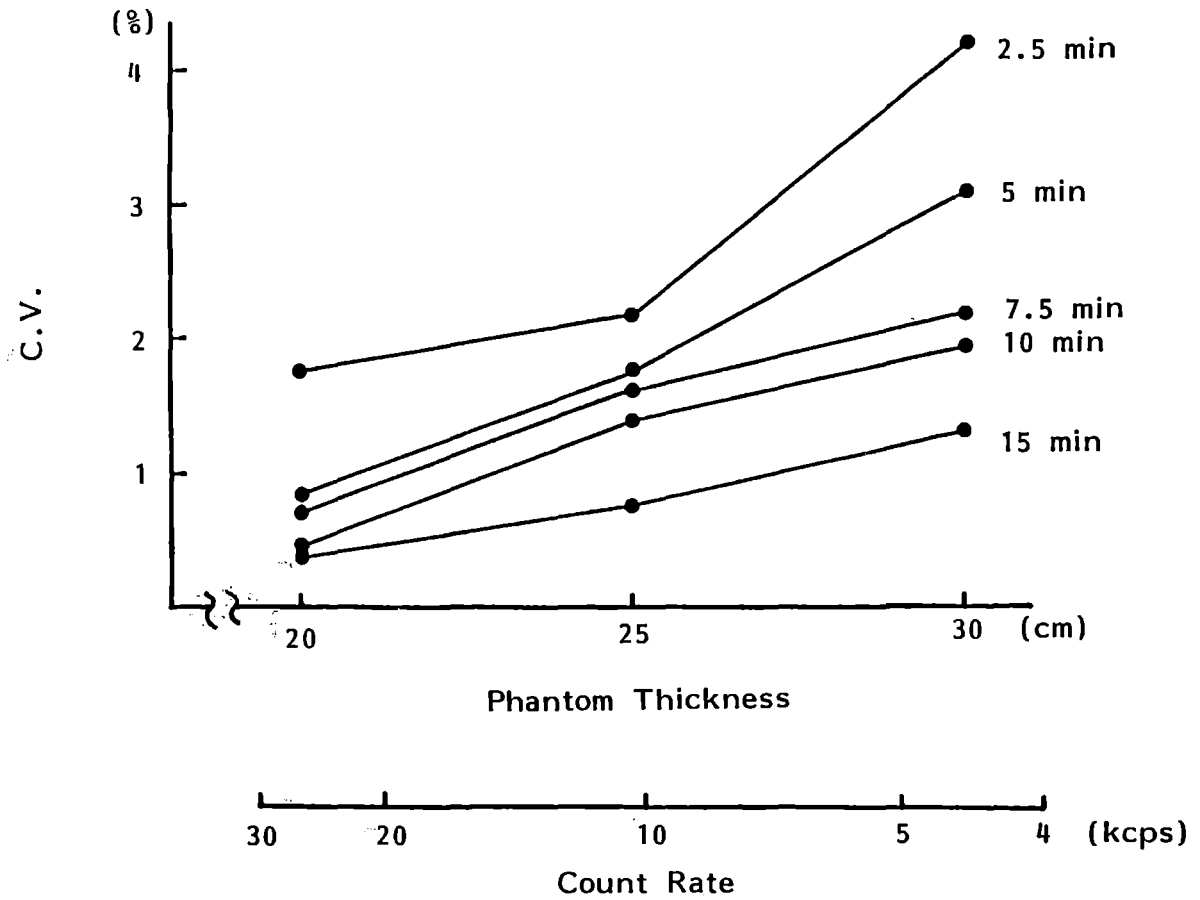


Fig. 9 被験者体厚と至適計測時間との関係

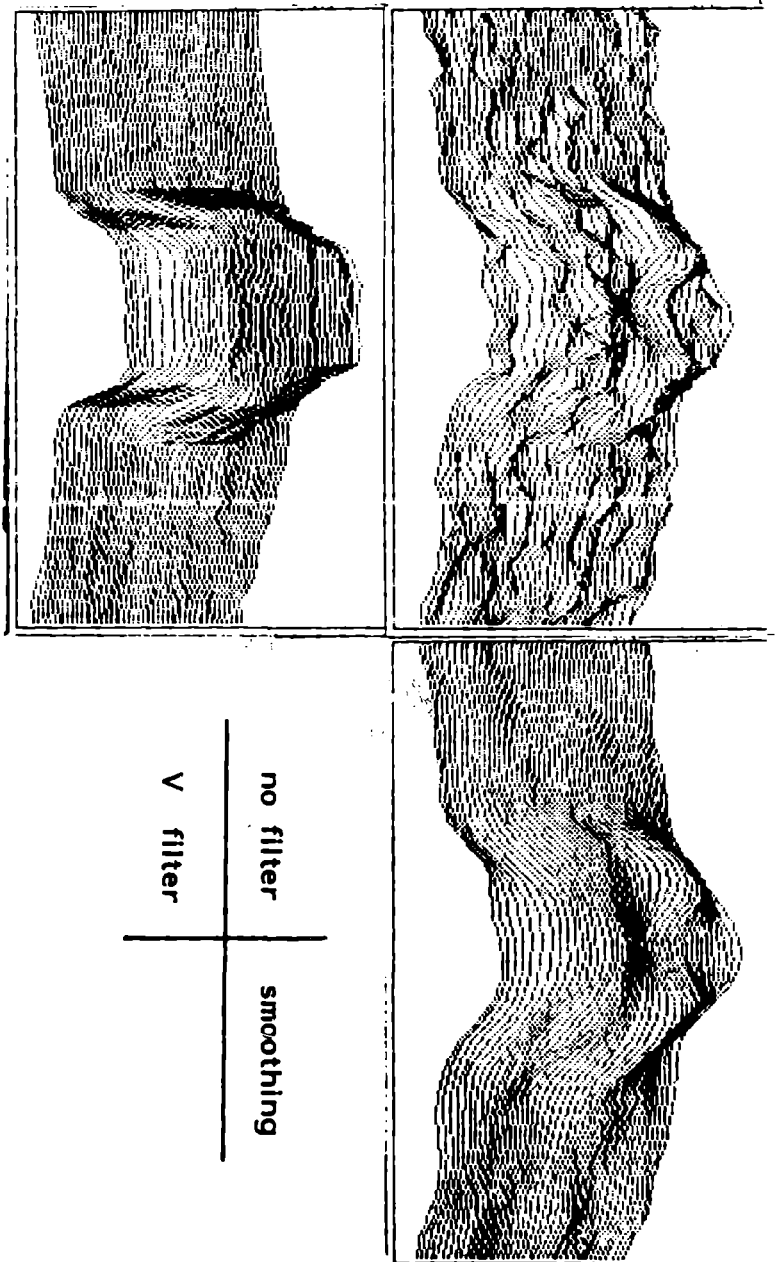


Fig. 10 BMC Projic Curueを用いた画面処理法の比較



Fig. 11 腰椎側面像の画面処理
右 : 9点荷重 smoothing, 左 : Vフィルタ

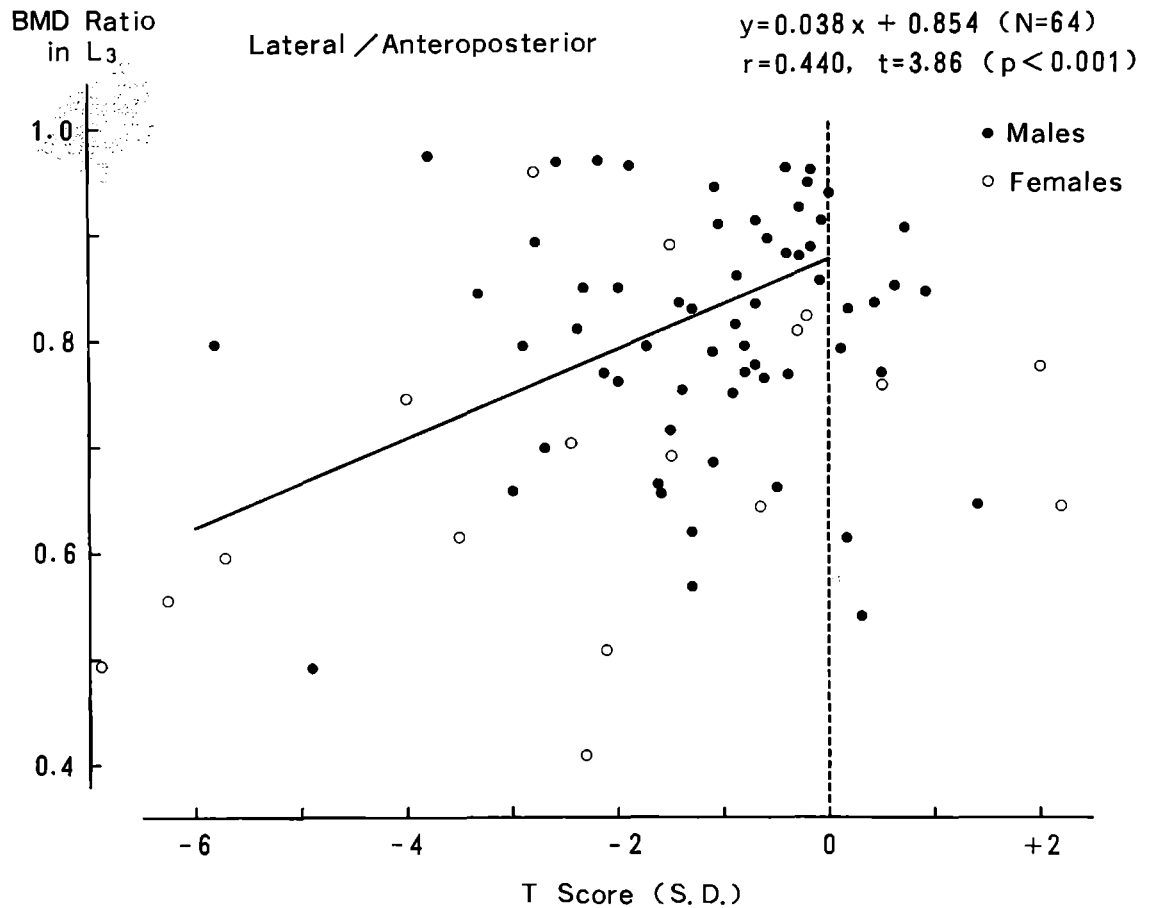


Fig. 12 DEXA装置における健常者のL/A値とTScoreとの関係

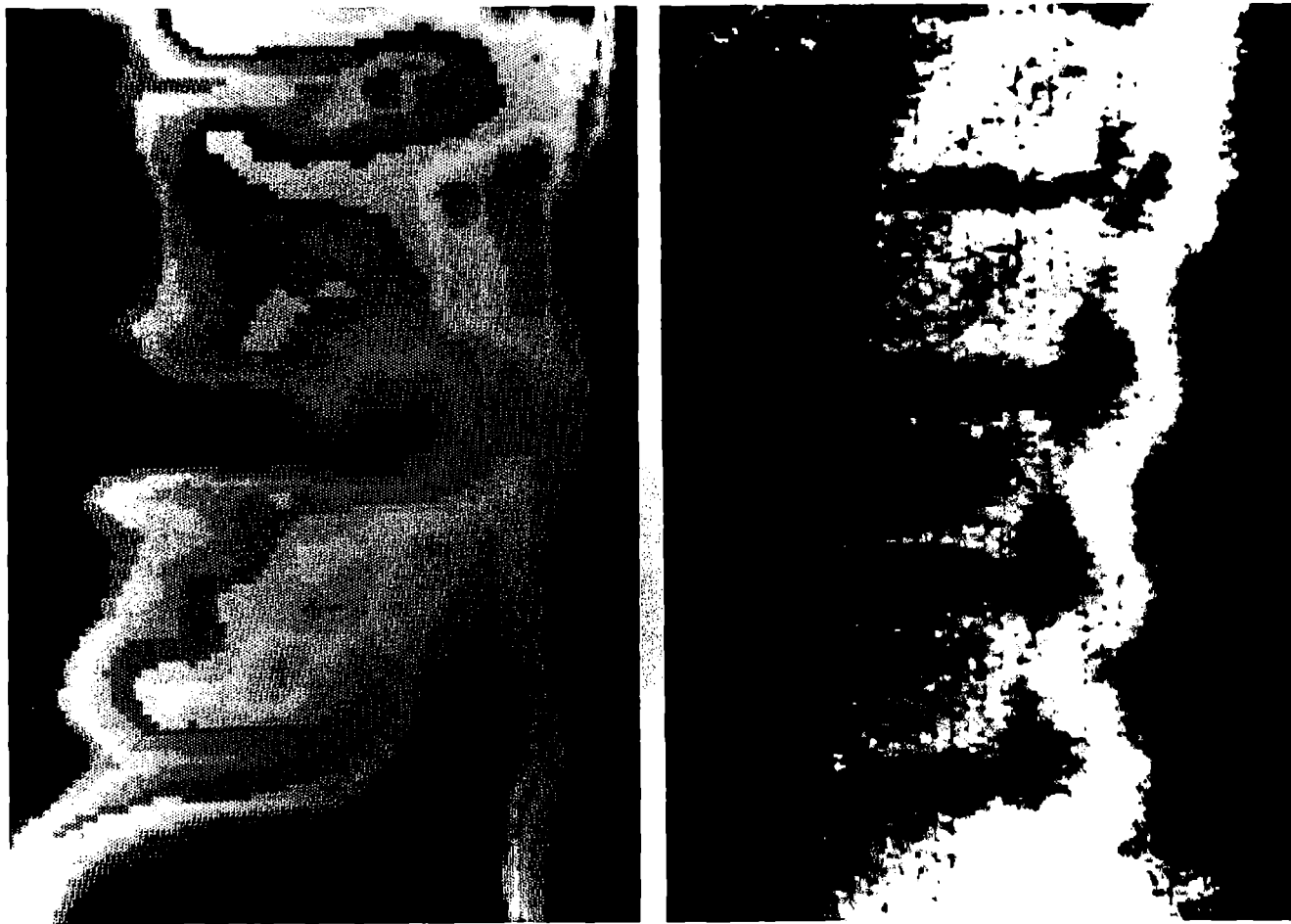


Fig. 13 DPA装置とDEXA装置とにおける腰椎側面像
右 : DPA装置, 左 : DEXA装置