

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

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による腰椎側面の骨塩定量を可能にするため, 解決すべき種々の問題点についての検討を行った. 検討項目は, ① 直接線が入射することによって引き起こされる高計数率に起因する問題として, 計数率の数え落とし, **pile-up**, **misplaced event count rate** および背部体厚報償フィルタの検討を行い, ② 前後像に比して被写体厚が増加することに伴う影響として, **beam hardening** と **spill-over** の検討を行った. また, 臨床的検討として, 測定精度および椎体部と関節・突起部との骨塩量の比を求めた. その結果, 高計数率の問題点は, 現在の線源強度 (50 mCi) であれば, 体厚補償フィルタを使用することによって解決されるが, 計測時間を短縮するために線源強度を増加させることは不可能であった. 被写体厚の増加に起因する諸問題は, 体厚が 25 cm を超えるときに認められた. これは, ^{153}Gd を線源に使用していることによるものであり, X 線を使用すれば解決できる. また, 測定精度は, 臨床に要求される値よりも劣っていた. 骨塩量の比に関しては, 側面像の有用性が示された.

このように, ^{153}Gd を線源に使用した二重光子吸収測定装置では腰椎側面の骨塩定量は難しいことが認められた. ただし, X 線を線源とした装置では実現の可能性があり, 今後更なる検討が望まれる. (平成元年1月10日採用)

A Trial for Bone Mineral Determination in Lumbar Vertebrae from a Lateral View Using by Dual Photon Absorptiometry

Tatsushi Tomomitsu, Masao Fukunaga, Nobuaki Otsuka and Rikushi Morita

To quantify the bone minerals in the lumbar vertebrae from a lateral view, fundamental and clinical studies were done. Problems were encountered in ① count rate performance, pile-up and a misplaced event count rate, which were caused by a high count rate and in ② beam hardening and spill-over, which were caused by increasing of the patient's body thickness. In addition, we studied the reproducibility of measurements and the ratio of bone minerals in the body to those in the joint processes in lumbar vertebrae for clinical applications.

The problem of a high count rate was resolved by using compensatory tissue filter. However, because of the need to reduce acquisition time, it was impossible to increase source activity.

The problem caused by an increase in the patient's body thickness occurred with thickness of 25 cm and above. This problem may be resolved in the future by using X-rays rather than ^{153}Gd as a source.

The reproducibility of bone mineral measurements from a lateral view was unsatisfactory in our clinical study. On the other hand, it was shown that knowledge of the ratio of bone minerals in the body to those in the joint processes in the lumbar vertebrae from a lateral view was useful.

As a result, it was concluded that quantification of bone minerals in the lumbar vertebrae from a lateral view using the ^{153}Gd system as a source was difficult. However, the use of an X-ray system as a source may be possible, and its use will be further investigated. (Accepted on January 10, 1989) *Kawasaki Igakkaishi* 15(2): 301-310, 1989

Key Words ① Dual photon absorptiometry ② Bone mineral density
③ Lumbar vertebrae ④ Lateral view

I. はじめに

本邦では65歳以上の高齢者人口の急増に伴い、早晩深刻な高齢化社会の到来することが予想される。高齢化社会の到来は、同時に寝たきり老人の原因となる骨粗鬆症と老人性痴呆の発症頻度を増加させるが、これらに対する医学的対応が重要となる。このうち骨粗鬆症の診断や治療経過の観察には、正確な骨塩定量が必須のものとされている。骨塩定量法には様々の方法^{1)~6)}が試みられているが、近年、光子吸収測定法の一つである dual photon absorptiometry (DPA) による骨塩定量が広く行われている。このDPAによる骨塩定量は、主として腰椎をその測定対象としているが、操作が簡単かつ精度に優れている。腰椎は、軀幹骨のうちでも海綿骨の比率が高く、海綿骨は皮質骨に比して骨塩量の変化が現れやすいといわれている。しかし、従来DPA装置で測定されている腰椎の前後方向からの骨塩定量法では、海綿骨が主体をなす椎体部と皮質骨が主体をなす関節・突起部とを同時に計測しており、椎体部のみを分離して測定し得ない欠点を有する。DPA装置により、腰椎側面の骨塩定量が可能であれば、海綿骨が主体をなす椎体部のみの骨塩定量が可能となり、上記の欠点は克服されるものと期待される。

今回、坐位方式で腰椎側面の位置決めが容易な ^{153}Gd を線源に使用したシンチレーションカメラ型DPA装置(DUALOMEX HC-1)を用い、腰椎側面の骨塩定量の基礎的検討を行ったので報告する。

II. 方法

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、面型の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、二つめは、前後像に比して被検者の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、腰椎側面における骨塩定量が可能か否かを明らかにするため、基礎的検討として、これらの問題点を検討した。さらに、臨床応用に際して問題となる腰椎側面における骨塩定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。

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、吸収体に 1 mm 厚の銅を用いて、吸収体厚と計数率との関係（計数率特性）を求めることによって行い、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 counts 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 (Series 20, Canberra) 上に取り出し、その波形を視認することによってその量を推測した。

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、背部の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 20 cm および側方体厚 28 cm の標準体型について作製した。作成方法は、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. 被検者の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 といった問題が知られている。 ^{153}Gd から放出される光子には 103 keV と 97 keV の γ 線と 41~47 keV 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 100 keV と 44 keV との二つの光電ピークとして認められる (Fig. 1)。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 線と同様の 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、これもまた ^{153}Gd を用いた DPA 装置では避けること

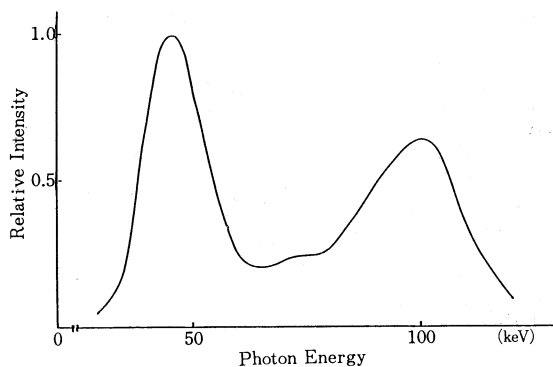


Fig. 1. Spectra of ^{153}Gd measured by NaI (Tl) detector

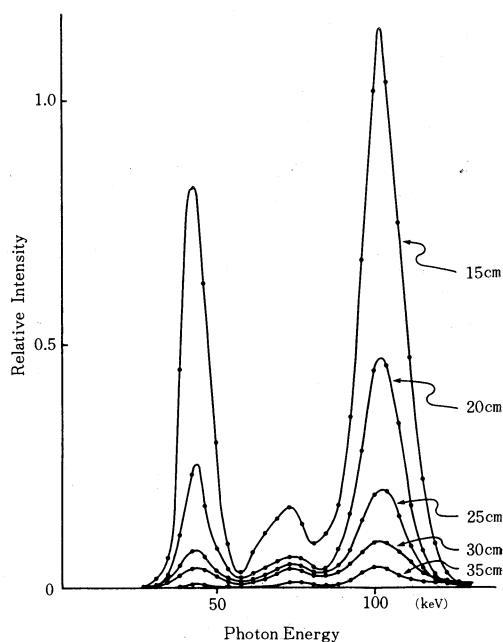


Fig. 2. Spectra of ^{153}Gd through various thickness of water phantom

のできない問題である。しかも、これらの影響は吸収体厚が増加するほど、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、Figure 2 に種々の厚さの吸収体 (15, 20, 25, 30, 35 cm 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、このように腰椎側面の骨塩定量法では前後像に比し放射線の減弱が顕著であり、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 および体厚と検出能との関係についての検討を行った。

beam hardening と spill-over の検討は、吸収体として水ファントム (30 cm × 30 cm, 厚さ 2~40 cm) 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、44 keV, 100 keV 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 のエネルギーウィンド幅は各々 ± 30% と ± 15% である。spill-over の検討では、上記の条件に加え、44 keV のエネルギー信号を消去する目的で 3 mm 厚の銅フィルタを線源部に装着して検討に供した。

検出能の検討には、直径 4 cm 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

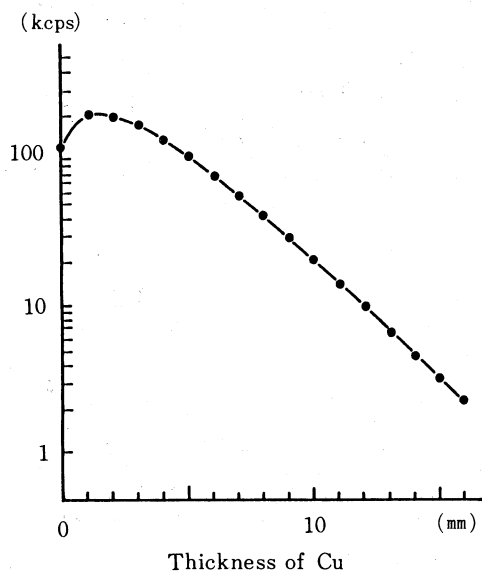


Fig. 3. Count rate performance of DUALOMEX HC-1

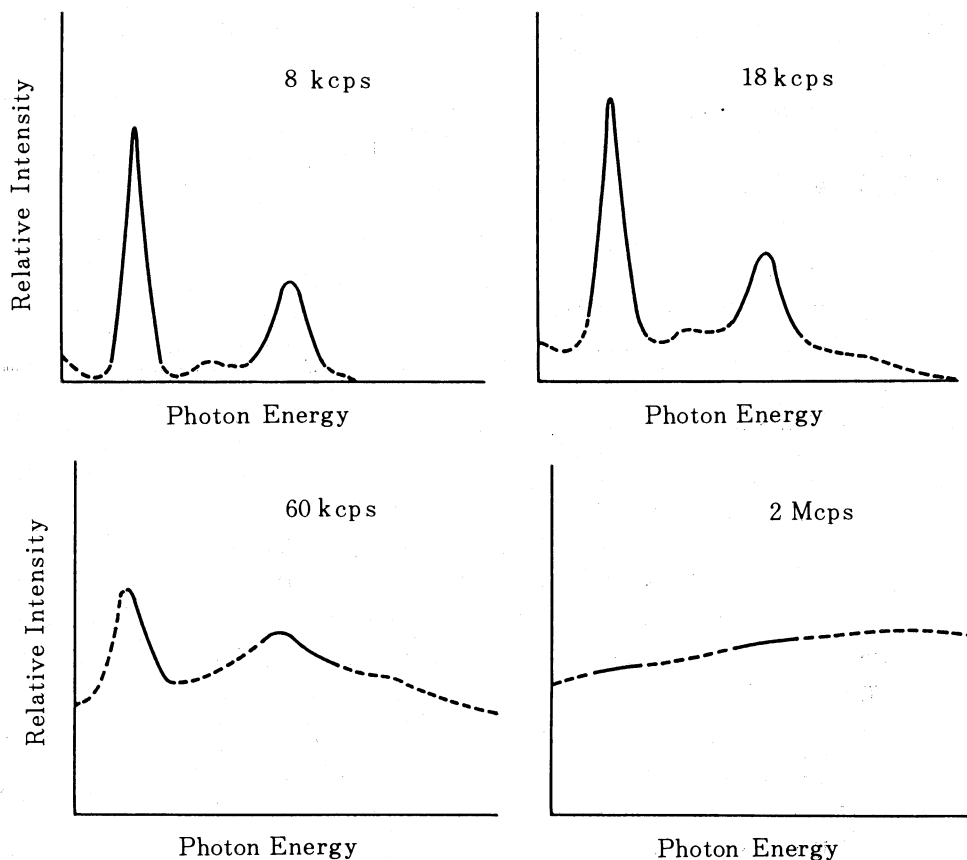


Fig. 4. Spectra of ¹⁵³Gd under various count rate

リン酸カリウム溶液 (K_2HPO_4 , 500, 250, 125, 62.5 mg/cm³) を封入し, さらにそれを水ファントム (30 cm×30 cm×20 cm) 中に設置したものを測定対象として用いた. ファントムの厚さについては, 20 cm のほかに水ファントムを付加した 25 cm および 30 cm についても検討を行った. 測定時間は 15 分間とし, その評価はデータ処理後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. 臨床的検討

臨床応用の検討として, 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を行った. 測定精度の検討は, 健常男性 (年齢 39 歳) 1 例と人体ファントム (京都科学標本) 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 bone mineral density (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 (年齢 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の比を求め, 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 腰椎であり, 計測時間は 15 分間である. 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 DPA 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.

III. 結 果

1. 高計数率の影響

計数の数え落とし, すなわち計数率特性の検討の結果を **Figure 3** に示す. 最大計数率は約 200kcps であり, 計数の直線性は 30kcps 以下の範囲で認められた. 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, 60 kcps では光電ピークの下方へのシフトが認められた. さらに 2 Mcps では ¹⁵³Gd の光電ピークが確認できないことが示された (**Fig. 4**). この結果は pile-up の影響が大きいことを示している.

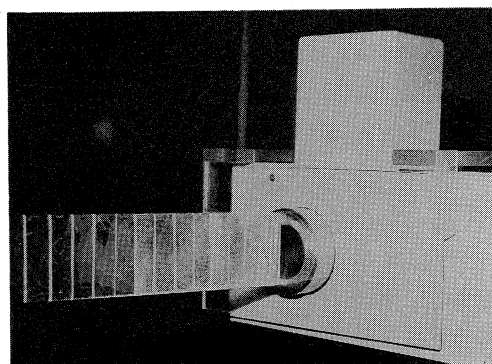


Fig. 5. Photograph of tissue compensatory filter attached on the head of DUALOMEX HC-1

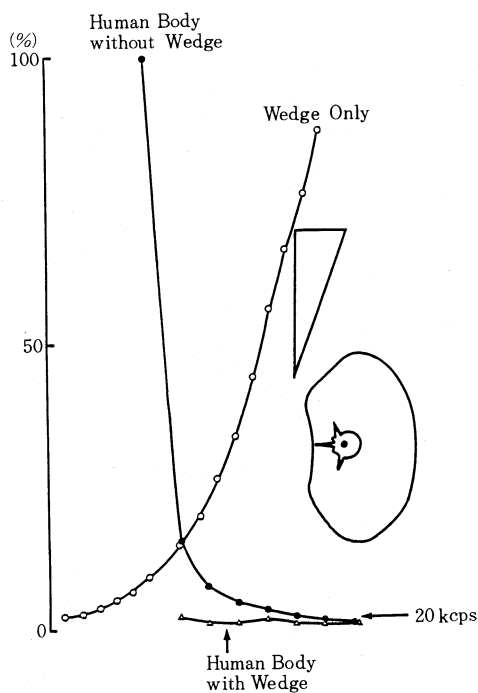


Fig. 6. Relative ratio of count rate performance: human body only (closed circle), wedge shaped tissue compensatory filter only (open circle), human body with tissue compensatory filter (open triangle)

直接線の入射を防ぐ目的で作成された体厚補償フィルタは、全長22.0 cm、幅5.0 cmであり、厚さ5 mmの台座に種々の長さの亚克力(0.75~21.5 cm)を付加したステップ状のウェッジ型である(Fig. 5)。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背部の計数率の変動の成績をFigure 6に示す。フィルタを使用することにより、検出器の視野内に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. 被検者の体厚増加による影響

beam hardening と spill-over の検討結果をFigure 7に示す。縦軸を片対数でとると、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、実測値が直線上から分離を示す点の体厚から出現すると考えられる。つまり、44 keVでは25 cm体厚から、100 keVでは30 cm体厚付近から認められた。他方、spill-overに関しては、そ

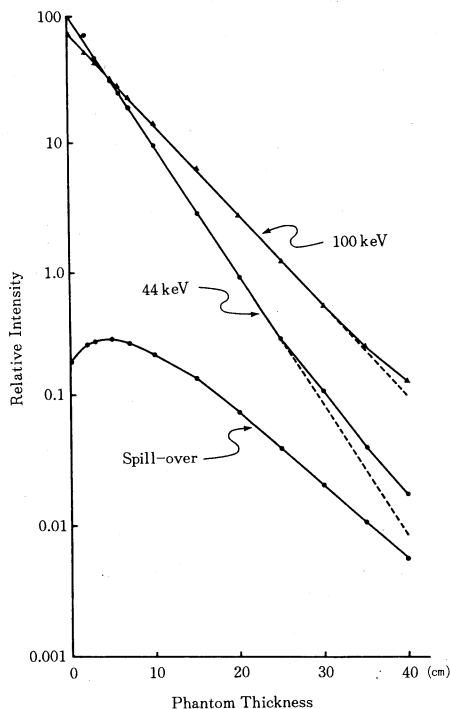


Fig. 7. The attenuation of the 44 keV and 100 keV beams and the spill-over effect of ^{153}Gd

の絶対値は体厚約5 cmをピークとして、厚さが増すほど減少したが、100 keV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。

体厚と検出能との関係をTable 1に示す。20 cm体厚では第2リン酸カリウム溶液の濃度62.5 mg/cm³まで検出可能であったが、30 cm体厚になると125 mg/cm³以下の濃度は検出できなかった。

3. 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、DUALOMEX HC-1では変動係数(coefficient of variation, C.V.)で評価した日差再現性が10.24%であり、他方QDR-1000ではC.V.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 2)。また人体ファントム実験において、DUALOMEX HC-1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、QDR-1000ではC.V. 6.52%の日差再現性が得られた。

DUALOMEX HC-1で測定された椎体部と関節・突起部の骨塩量比は、若年者が1.254であ

Table 1. Relation between K_2HPO_4 concentrations and phantom thickness

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 2. Reproducibility of bone mineral density measured by DUALOMEX HC-1 and QDR-1000

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

assessed by C.V.

Table 3. Comparison of bone mineral density values in body and joint process of lumbar vertebrae

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

*p < 0.02

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、QDR-1000で測定された若年者の両部位の骨塩量比は1.528であり、DUALOMEX HC-1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 3**)。

IV. 考 察

高計数率の影響を検討するために行った計数率特性では、約30 kcpsまで直線性が得られた。他方、pile-upは、18 kcpsにおいてはその影響がほとんど認められなかった。また、misplaced event count rateは、線源として^{99m}TcO₄⁻を用いた報告⁷⁾によると、体厚5 cm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内であれば、計数の数え落とし、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、今回作成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のために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約15 kcpsであることを考慮すると、現在の線源強度50 mCiの約2倍の100 mCi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、44 keVにおける¹⁵³Gdのbeam hardeningは約25 cm体厚付近から観察された。これは、体厚が25 cm以下と考えられる腰椎前後方向における骨塩定量では、beam hardeningをほとんど考慮する必要がなく、逆に体厚が25 cmを超えると考えられる腰椎側面における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、視野内の測定される各部位で行う必要があり、面型の検出器を有するシンチレーションカメラ型DPA装置(DUALOMEX HC-1)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は筆者らが既に報告⁸⁾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、その補正は可能である。しかし、補正には誤差が伴うのは一般的であり、spill-overの補正に際しても同様であり、その増加に伴う測定精度の低下をきたす。20 cm体厚では44 keVのカウント数の10%以下であったspill-overの量が、30 cm体厚では20%にも達しており、spill-overの影響も腰椎側面における骨塩定量の測定精度低下の一因と考えられた。

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、前述の基礎的検討で行った種々の影響を反映して、DUALOMEX HC-1の精度はQDR-1000のそれに比して明らかに

劣っていた。特に、人体ファントムを測定対象としたときには DUALOMEX HC-1 では測定不能であった。これは、ファントムは乾燥骨よりなり、そのため生体の椎体骨に比して放射線の減弱が少なく、特に海綿骨が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、DUALOMEX HC-1 と QDR-1000 とを用いて取得した腰椎側面の骨塩イメージでも、両装置の測定精度を反映して、QDR-1000の方が DUALOMEX HC-1 よりも、椎体の描出能が優れており、かつ椎体部と関節・突起部の骨塩量の違いが明瞭であった (Fig. 8)。

X線を線源としたQDR-1000の骨塩測定能がDUALOMEX HC-1 よりも優れていたことには、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たりの光子数が飛躍的に増加したことであり、二つには、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、これはラジオアイソトープに換算すると数10 Ciないしは数100 Ciの線源を使用したのに匹

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、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て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は二つのエネルギーを時間的に切り替えて放出し、各々を別個に検出することによって解決されている。X線装置では特に問題となる beam hardeningについては、QDR-1000ではDPAとは骨塩量の計算方法が異なっており、独特の方法によって beam hardening の処理がなされている。この処理方法は、シンチレーションカメラ型のDPA装置であるDUALOMEX HC-1には適用できないものである。QDR-1000を用いた腰椎側面における骨塩定量の唯一の問題点は、体厚の増加に伴う検出能の低下である。この問題点は、いかなる装置を使用しても解決不可能である。したがって、DPAの原理を応用した測定装置による腰椎側面における骨塩定量の測定精度の限界は、現段階ではQDR-1000で得られた6%前後であろうと推測された。

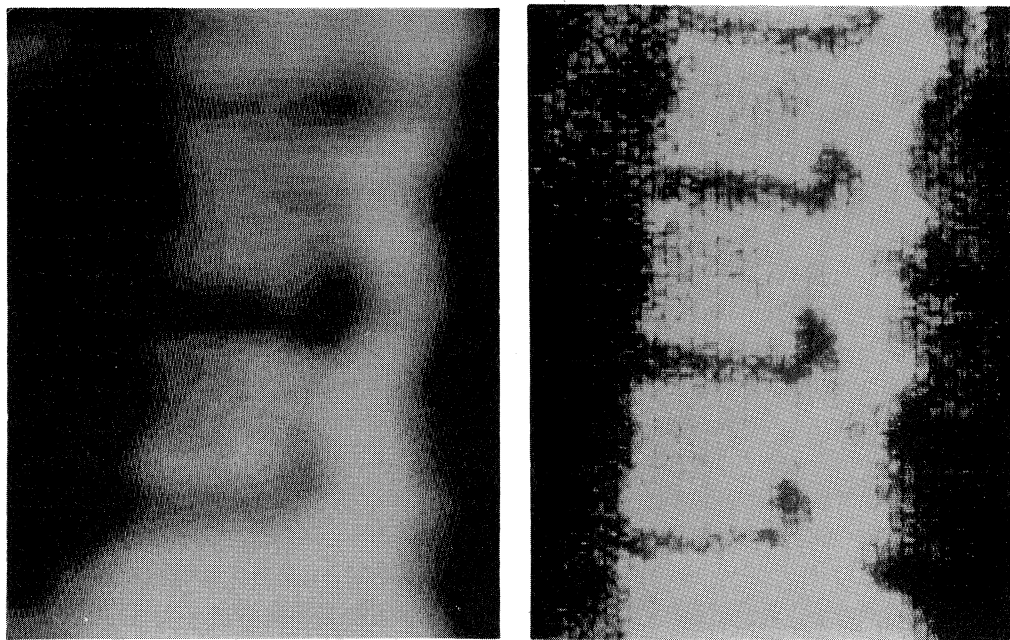


Fig. 8. BMC image of lumbar vertebrae on lateral view in normal subject
left: obtained by DUALOMEX HC-1 right: obtained by QDR-1000

臨床的検討として行った DUALOMEX HC-1 による椎体部と関節・突起部の骨塩比は、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海綿骨が主体をなす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、その測定精度は低下を示す。また、若年者を測定対象として用いたとき、DUALOMEX HC-1 ではその骨塩量比が 1.254 であったのに対して QDR-1000 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、QDR-1000 で得られた値がより真実に近いものと推測された。

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ほか、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、 ^{153}Gd

を線源に用いた DUALOMEX HC-1 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 QDR-1000 では、その可能性が残されているものの、いまだ臨床応用には soft ware, hard ware 両面の改良が不可欠であり、今後更なる基礎的検討が望まれる。

V. ま と め

今回、DPA 装置を用いた腰椎側面における骨塩定量を検討した結果、本法は原理的に優れているものの、その実現はきわめて難しいことが示された。特に、 ^{153}Gd を線源とした DPA 装置では解決が困難な問題が山積しており、その実現は不可能に近いと思われる。他方、X線を線源とした装置ではその実現の可能性があるものの、今後引き続き検討する必要性が認められた。

本研究の一部は、文部省科学研究費「63480255 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」および川崎医科大学プロジェクト研究費「63-805 加齢に伴う骨塩量減少の成因に関する研究」による。

文 献

- 1) 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
- 2) Cameron, J.R. and Sorenson, J.: Measurement of bone mineral in vivo: An improved method. Science 142: 230—232, 1963
- 3) 福永仁夫, 大塚信昭, 曾根照喜, 永井清久, 森田陸司, 梶原康正, 西下創一: 脊椎骨 Phantom を併用した CT scan による第 3 腰椎海綿骨の骨塩量測定法. 日医放会誌 46: 659—664, 1986
- 4) Dunn, W.L., Wahner, H.W. and Riggs, B.L.: Measurement of bone mineral content in human vertebrae and hip by dual photon absorptiometry. Radiology 136: 485—487, 1980
- 5) 友光達志, 福永仁夫, 大塚信昭, 曾根照喜, 永井清久, 小野志磨人, 古川高子, 柳元真一, 村中 明, 森田陸司, 鳥塚莞爾: ガンマ・カメラによる Dual Photon Absorptiometry 装置の開発. 核医学 23: 499—503, 1986
- 6) 福永仁夫, 大塚信昭, 小野志磨人, 永井清久, 光森通英, 村中 明, 古川高子, 友光達志, 柳元真一, 森田陸司: 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

- 7) 柳元真一, 友光達志, 村中 明, 曾根照喜, 大塚信昭, 福永仁夫, 森田陸司, 日地啓夫, 板谷道信, 西村明久, 西下創一: 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
- 8) 友光達志, 柳元真一, 成広直正, 三村浩朗, 石井幸志, 日地啓夫: Dual Photon Absorptiometry (DPA) 装置における spill-over 効果の補正. 日放技会誌 43: 667-671, 1987