

多施設によるファンビーム方式 DXA (EXPERT) の基本性能に関する検討

長崎大学保健管理センター 中 田 朋 子・石 井 伸 子
長崎大学医学部放射線科 伊 藤 昌 子・林 邦 昭
長崎記念病院 林 田 和 弘
長崎県済生会病院 河 野 順
長崎北病院 藤 下 稔 雅

Key words: Dual energy X-ray absorptiometry (DXA: 二重エネルギー X 線吸収測定法), Fan-beam (ファンビーム), Pencil-beam (ペンスルビーム), Cross-calibration (相互校正)

要 旨

最近開発されたファンビーム方式 DXA 装置 EXPERT に関して、多施設による測定精度評価を行った。

3 台の EXPERT と 1 台のペンスルビーム方式 DXA 装置 DPX-L を用いて腰椎ファントムの天板正中での測定を行い、再現性を確かめたところ、いずれの装置も変動率(% CV)は 1% 以下の良好な結果が得られたが、ペンスルビーム方式 DPX-L は、ファンビーム方式 EXPERT よりさらに良好な再現性が認められた。EXPERT において正中で腰椎ファントムを測定した値を基準にすると、scan の中心が左右にずれた場合の骨密度(BMD)は 3% 以内、同ファントムに MIX-DP を付加し被写体厚が変化した場合の BMD は 4% 以内の変化がみられ、測定値は検査時の患者のポジショニングや体格による影響を受けると考えられた。しかし、その傾向は同一機種でも装置によって異なっていた。日常精度管理(daily QA)では把握できない誤差であるが、臨床においてはこれらの影響は無視できないものであり、腰椎ファントムを用いた定期的な精度管理が必要と考えられた。

3 台の EXPERT 間には極めて高い相関性が得られ (EXPERT A vs. B: $r=0.99999$, A vs. C: $r=0.99977$, B vs. C: $r=0.99966$), また EXPERT と DPX-L との相関も極めて高かった (EXPERT A vs. DPX-L: $r=0.99983$, B vs. DPX-L: $r=0.99990$, C vs. DPX-L: $r=0.99921$)。以上よりこれらの装置間では、測定結果の相互利用の可能性が示唆された。

はじめに

近年、骨粗鬆症の診断には骨密度の測定が不可欠とされ、様々な骨量測定装置が開発され、普及している。その中で二重エネルギー X 線吸収 (dual energy X-ray absorptiometry: DXA) 装置は、従来ペンスルビーム X 線を用いたものが主流であったが、最近、ファンビーム X 線を用いる方式が普及しつつあり、測定時間が大幅に短縮した。我々は、同一機種の 3 台のファンビーム方式 DXA 装置と 1 台のペンスルビーム方式

DXA 装置について基本性能に関する測定精度を評価し、また装置間での測定値の比較により、測定結果の相互利用の可能性についても検討した。

使用機器と方法

今回使用した機種は、ファンビーム方式 DXA 装置は Lunar 社 EXPERT, ペンスルビーム方式 DXA 装置は同じく Lunar 社 DPX-L である。腰椎ファントムとして ESP (European Spine Phantom) を用い、腰椎

Table 1. Precision of bone mineral density values measured by fan-beam type and pencil-beam type DXA systems.

Machine	BMD (g/cm ²)	% CV	Area (cm ²)	% CV	BMC (g)	% CV
EXPERT A	1.089±0.006	0.54	31.0±0.1	0.27	33.8±0.3	0.82
EXPERT B	1.077±0.005	0.48	30.9±0.1	0.18	33.3±0.2	0.65
EXPERT C	1.099±0.008	0.70	30.8±0.1	0.27	33.8±0.2	0.71
EXPERT A-C	1.088±0.011	1.02	30.9±0.1	0.64	33.6±0.3	0.85
DPX-L	1.080±0.005	0.43	28.4±0.0	0.00	30.6±0.2	0.66

BMD was measured by three fan-beam type DXA systems (EXPERT A, B and C) and one pencil-beam type DXA system (DPX-L). Each value is expressed as mean±SD (n=5). CV denotes coefficient of variation, BMC; bone mineral content.

正面の骨密度測定を行った。ESP は骨塩定量測定用標準ファントムで、外形寸法は幅26×長さ12×高さ18cmであり、ガスや脂肪を配慮すると高さ18cmは人体では20cmに相当する¹⁾。本ファントムは、大きさとハイドロキシアパタイト濃度 (50, 100, 200HAMg/cm³) のそれぞれ異なる3椎体を水等価物質で包埋したものである^{1),2)}。scan mode は EXPERT では Fast mode (134KVp, 5 mA, 14.4sec), DPX-L では Medium mode (76KVp, 750μA, 7 min 23sec) で行った。

ファントム実験1：3台の EXPERT (装置A, B, C) と1台の DPX-L を用いて、ESP を天板の正中に合わせ5回ずつ測定し、各装置における骨密度 (BMD)、骨量 (BMC)、骨面積 (Area) の再現性を確かめる。

ファントム実験2：scan を中心に左右に1, 2, 3 cm ずらしてそれぞれ5回ずつ測定を行い、BMD, BMC, Area の変化をみる。

ファントム実験3：ESP の上に組織等価物質である MIX-DP を1, 3, 5, 7, 10cm と付加してそれぞれ5回ずつ測定し、被写体厚の変化に対する BMD, BMC, Area の各測定値の変化をみる。

ファントム実験4：密度の異なる3椎体 (低 BMD 椎体, 中 BMD 椎体, 高 BMD 椎体) の骨密度を5回ずつ測定し、各々個別に装置間における再現性を確かめる。

ファントム実験5：EXPERT 装置A を基準として、各装置間の測定値の相関性を確かめる。

結 果

1. 再現性

ESP (3椎体全体) を正中で測定したときの再現性 (Table 1) をみると、BMD の% CV は DPX-L が0.43% と最も優れ、EXPERT でも0.48-0.70% と1% 以下の良好な結果が得られた。EXPERT での Area の変動率は0.18-0.27% と非常に小さく、BMC の再現性は0.65-0.82% であった。また、3台の EXPERT 間での BMD の% CV は1.02% であり、同一機種 of 装置間の測定値も安定していた。

2. scan 中心の左右ずれに対する測定値の変化

scan 中心を左右1, 2, 3 cm とずらして測定を行った場合の EXPERT における BMD の変化は、装置A では1.089-1.114 g/cm²、装置B では1.077-1.098 g/cm²、装置C では1.065-1.116 g/cm² であった。左右のずれに対する変化は3装置間において同一の傾向は認められなかった (Fig. 1)。いずれの位置においても BMD の変動率は1% 以下の良好な再現性を保っていた。

正中での測定値を基準として各測定値の%

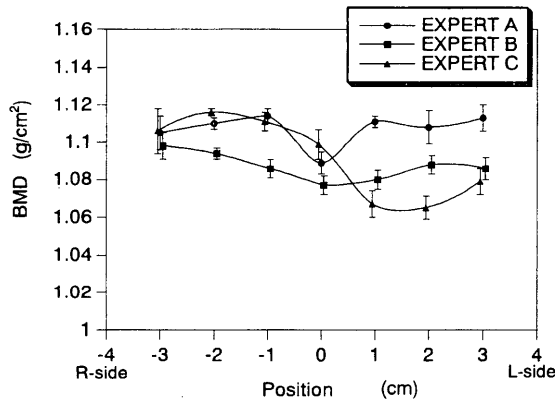


Fig. 1. Influence of positioning shift from the center on BMD values measured by three sets of fan-beam types DXA systems (EXPERT A, B and C). Each value is expressed as mean \pm SD (n=5).

変化をみると、BMDは $\pm 3\%$ 以内 (Fig. 2a)、BMCは $\pm 4\%$ 以内 (Fig. 2b) での変化がみられた。Areaの変化は $\pm 1\%$ 以内 (Fig. 2c) と非常に安定していた。

3. 被写体厚の変化に対する測定値の変化

ESPの上にMIX-DPを付加し、ファントム厚を変化させて測定を行った場合のBMDの変化は、EXPERT装置Aでは $1.089-1.129 \text{ g/cm}^2$ 、装置Bでは $1.056-1.095 \text{ g/cm}^2$ 、装置Cでは $1.091-1.102 \text{ g/cm}^2$ 、DPX-Lでは $1.079-1.101 \text{ g/cm}^2$ であった。3台のEXPERTの測定値の変化は左右ずれと同様に、ファントムの厚さに対しても3装置間に同一の傾向は認められなかった。また、MIX-DPが10cmのときは各装置とも測定値のばらつきが大きく、中でも装置Aでは 2.43% と変動率は大きかった (Fig. 3)。

ESP単体の測定値を基準として、ESPにMIX-DPを加えたときの各測定値の変化率(%)をみると、BMD、BMCともに $\pm 4\%$ 以内 (Fig. 4a, 4b)、Areaの変化は $\pm 1\%$ 以内 (Fig. 4c) であり非常に安定していると考えられた。

以上1~3の検討は、ESPの3椎体全体の

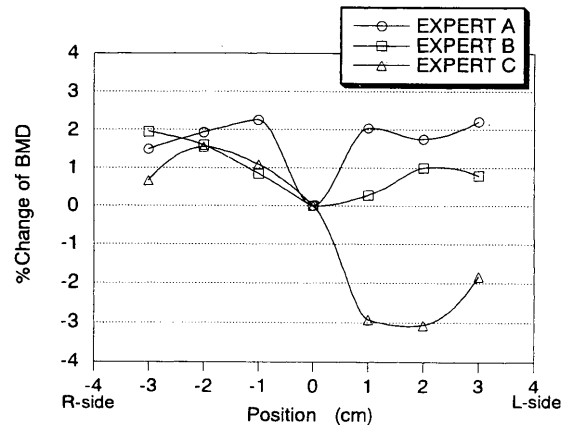


Fig. 2a. % change of BMD

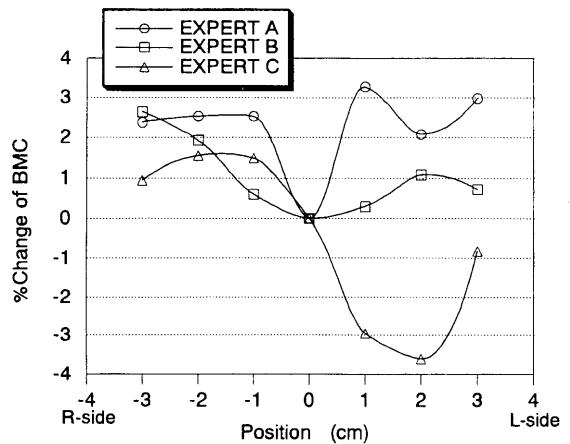


Fig. 2b. % change of BMC

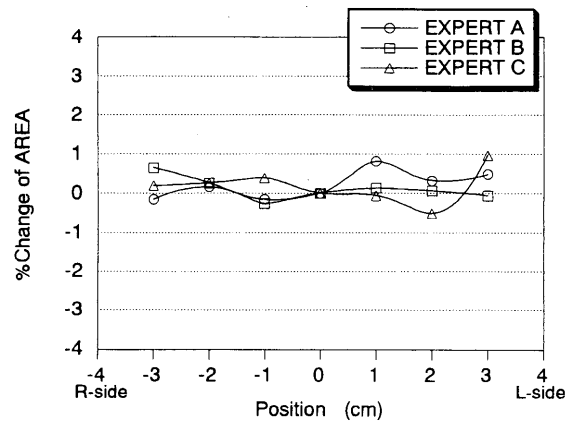


Fig. 2c. % change of Area

Fig. 2. Changes in values of BMD (2a), BMC (2b) and Area (2c) by the shift from the center. Changes of BMD, BMC and projected area (Area) are shown in EXPERT A, B and C, respectively. Each value represents the percentage of the value changed by positioning.

測定値についての検討結果である。

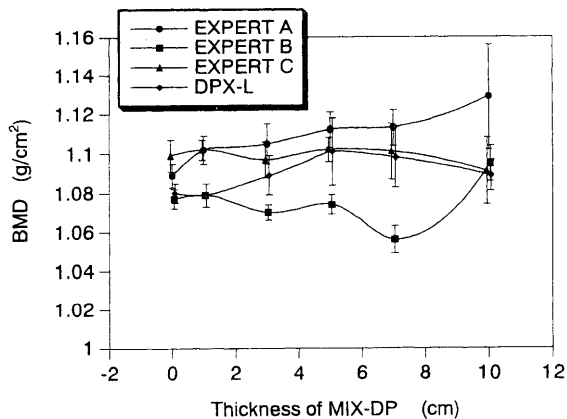


Fig.3. Influence of thickness of object on BMD values measured by fan-beam type DXA and pencil-beam type DXA. Three sets of fan-beam type DXA (EXPERT A, B and C) and one set of pencil-beam type DXA (DPX-L) were used. Each value is expressed as mean \pm SD (n=5).

4. ハイドロキシアパタイト濃度の変化に対する装置間での測定値の違い

ESP における 3 種の濃度の椎体の測定値を各々検討した。低 BMD 椎体の BMD は $0.537-0.564 \text{ g/cm}^2$, 中 BMD 椎体は $1.077-1.098 \text{ g/cm}^2$, 高 BMD 椎体は $1.565-1.682 \text{ g/cm}^2$ であり, 3 台の EXPERT 間での測定値の変動率は, 中 BMD 椎体では 0.97% と最も小さく, 低 BMD 椎体では 2.76%, 高 BMD 椎体では 2.91% と変動率がやや大きかった (Table 2)。

5. 装置間の測定値の相関性

EXPERT 装置 A における測定値を基準として各装置と比較してみると, 装置 B と装置 A との相関は $r = 0.99999$, $B = 0.95521A + 0.025567$ ($P < 0.005$), 装置 C と装置 A との相関は $r = 0.99977$, $C = 1.0681A - 0.072583$ ($P < 0.05$), DPX-L と装置 A との相関は $r = 0.99983$, $DPX-L = 0.93466A + 0.041159$ ($P < 0.05$) といずれの装置とも極めて高い相関性が得られた (Fig. 5)。

考 察

荒井らは 3 社の同じグレードのペンシルビーム方式 DXA 装置に関して基本性能の比較検討を行い, その正確度と装置間の BMD 値の相関性が優れていることを示した³⁾。また, 近年ファンビーム方式 DXA 装置の出現と普及に伴い, 従来のペンシルビーム方式 DXA 装置との測定値の比較検討に関する報告^{4)~7)} がなされているが, それらはペンシルビーム方式 DXA 装置とファンビーム方式 DXA 装置それぞれ 1 台ずつの比較がほとんどである。

我々は同一機種 of ファンビーム方式 DXA 装置 EXPERT (Lunar 社) が設置されている 3 施設において, その基本性能を比較検討し, また, ペンシルビーム方式 DXA 装置 DPX-L (Lunar 社) とも比較を行った。

測定値の再現性をみると, BMD の変動率は正中で測定したとき EXPERT では 0.48-0.70%, DPX-L では 0.43% であり, いずれの装置も 1% 以下と良好であった。また, 3 台の EXPERT における変動率は 1.02% であり装置間でも安定した結果が得られた。しかし, Frank らの報告⁸⁾ と同様に, ファンビーム方式 (EXPERT) はペンシルビーム方式 (DPX-L) より測定精度は劣っていた。EXPERT の BMD の測定精度については, scan 中心が左右にずれた場合はほぼ良好である (1% CV 以内) が, 被写体厚の変化に対しては MIX-DP 付加厚 10cm のとき, % CV は 2.43% と低下した。これは被写体による散乱線が増加し, 測定値に影響を及ぼすためと思われる。ESP に MIX-DP を 10cm 付加したときの厚さは人体では体厚 30cm に相当するが, 大多数の被検者の体厚は 10cm から 25cm の間にあるものと思われ, 通常 of 臨床使用においてはあまり問題にならないと考えられる³⁾。しかしながら, 非常に体格の良い患者や肥満患者の検査の場合

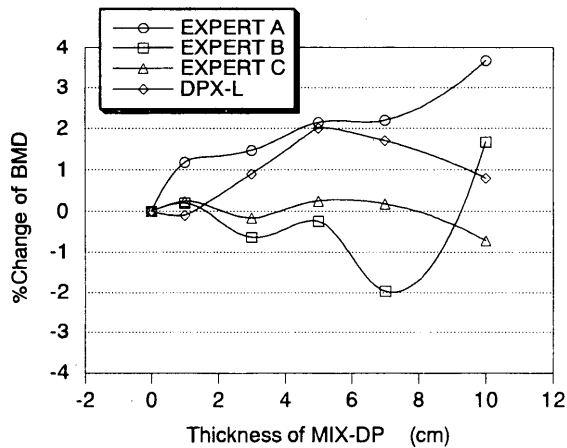


Fig. 4a. % change of BMD

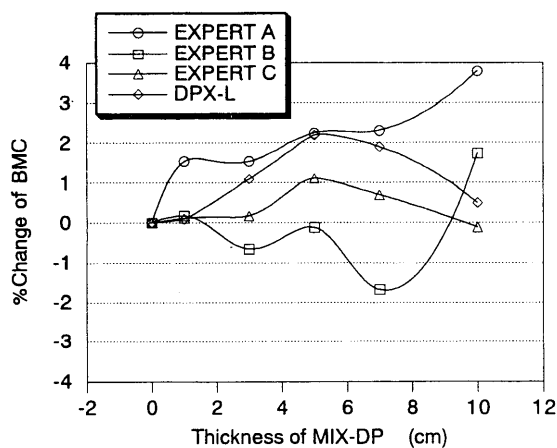


Fig. 4b. % change of BMC

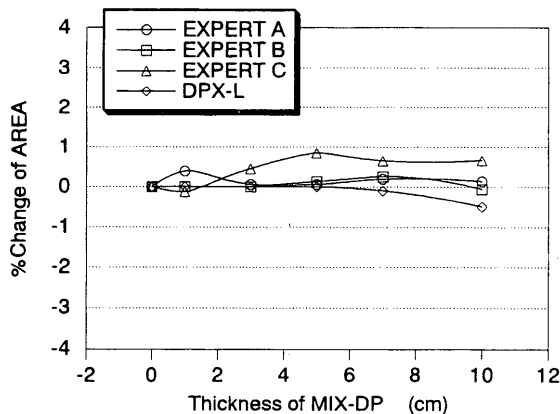


Fig. 4c. % change of Area

Fig. 4. Changes in values of BMD(4a), BMC (4b) and Area(4c) by thickness of object. Changes of BMD, BMC and Area are shown in EXPERT A, B and C, and DPX-L, respectively. Each value represents the percentage of the value changed by thickness.

には、測定誤差が大きいことを念頭に入れておく必要が示された。

Blake らは QDR 1000 と QDR 2000

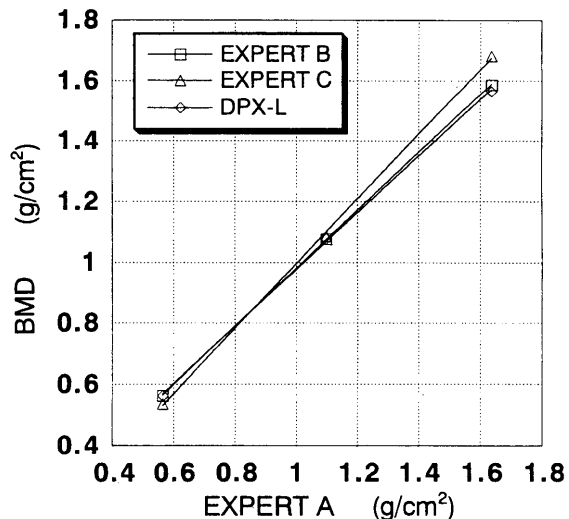


Fig. 5. Correlation of BMD values measured by EXPERT A with values measured by EXPERT B or C or DPX-L. Horizontal line indicates BMD measured by EXPERT A, while vertical line indicates BMD measured by EXPERT B or C or DPX-L.

(Hologic 社)の測定値を比較し、ペンシルビームからファンビーム方式への変化は Area と BMC の値にかなり影響を及ぼすが、臨床的に重要な BMD 値への影響は無視してよいほど小さいと記述している⁴⁾。今回の検討でも、EXPERT と DPX-L についても同様の結果であった。Area と BMC の値は、ファンビーム方式では常に問題となる X 線管球-被写体間距離や被写体-検出器間距離、X 線ビームの形状など幾何学的因子の影響を受けるが、その他に EXPERT と DPX-L では、管球が上で検出器が天板の下にある over-tube 方式 (EXPERT) と、その逆に管球が天板の下にある under-tube 方式 (DPX-L) という構造上の違いもあり、様々な因子に影響を受けていると考えられる。

scan 中心の左右ずれや被写体厚の変化に対する測定値の変化をみると、Area は非常に安定しており、BMD の変化は BMC の変化によるものであった。3 台の EXPERT の変化に同じ傾向はみられず、これらの変化は装置ごとの測定誤差範囲と解釈することもで

Table 2. Comparison of BMD values measured by fan-beam type and pencil-beam type DXA in vertebral of Low, medium and high mineral content

Machine	Vertebra Low			Medium			High		
	BMD (g/cm ²)	Area (cm ²)	BMC (g)	BMD (g/cm ²)	Area (cm ²)	BMC (g)	BMD (g/cm ²)	Area (cm ²)	BMC (g)
EXPERT A	0.564±0.009	10.7±0.2	6.0±0.0	1.098±0.027	10.2±0.3	11.2±0.1	1.636±0.037	10.1±0.2	16.6±0.1
EXPERT B	0.563±0.005	10.3±0.2	5.8±0.1	1.077±0.026	10.3±0.3	11.2±0.1	1.587±0.032	10.3±0.2	16.4±0.2
EXPERT C	0.537±0.012	10.4±0.3	5.6±0.1	1.086±0.012	10.1±0.1	11.0±0.1	1.682±0.033	10.3±0.3	17.3±0.2
EXPERT A-C	0.555±0.015	10.5±0.2	5.8±0.2	1.087±0.011	10.2±0.1	11.1±0.1	1.635±0.048	10.2±0.1	16.8±0.5
%CV	2.76	1.99	3.45	0.97	0.98	1.04	2.91	1.13	2.82
DPX-L	0.563±0.007	9.2±0.0	5.2±0.1	1.078±0.009	9.4±0.0	10.2±0.1	1.565±0.012	9.8±0.0	15.3±0.1

BMDs were measured by fan-beam type DXA (EXPERT A, B and C) and pencil-beam type DXA (DPX-L). Each value is expressed as mean±SD (n=5). CV denotes coefficient of variation.

きる。Area に関しては今回実験に用いた被写体がファントムであったため、装置の解析ソフトによる自動トレース機能により、このような良好な結果が得られたと考えられるが、患者を検査する場合には、関心領域のトレースのかなりの部分を検者が手動で行うことも多く、検者の熟練度や個人差による Area の値の変化が BMD に影響すると思われる。

scan 中心を左右にずらした場合、BMD の変化が最も大きかったのは、正中での基準値の約 3% であり、検査時のポジショニングの再現性の良し悪しが測定値の再現性の良し悪しにつながると考えられる。中でも施設 C の装置では、正中より右側へずらすと BMD は増加し、左側へずらすと低下する傾向にあり、その変化も大きかった。従って、特にポジショニングに注意を要することが重要であり、加えて検出器の配列が X 線管球に対し平行であるか、また、多数の検出器の感度は均一であるかなどの装置の再点検と調整も必要と考えられる。

被写体厚を変化させた場合は MIX-DP 厚が 7 cm, 10 cm と厚くなると、装置間での BMD のばらつきが大きくなった。その理由としては、被写体による散乱線が増加し、測定値に影響しているためと思われる、体厚が 27 cm 以上

の患者は測定精度の問題だけでなく、装置間の再現性にも影響すると考えられた。

次に、ESP の 3 椎体 (低 BMD 椎体, 中 BMD 椎体, 高 BMD 椎体) を各々比較してみたところ、中 BMD 椎体の測定精度は % CV が 0.97% と良好であったが、低 BMD 椎体と高 BMD 椎体では約 3% あり、測定値のばらつきがやや大きかった。高 BMD 椎体のハイドロキシアパタイト濃度は BMD で約 1.6 g/cm² と非常に高く、その付近の骨密度は臨床上是あまり問題ないが、低 BMD 椎体の 0.6 g/cm² 付近は特に経過観察の必要な骨密度の低下している患者の測定値に該当するため、臨床無視できない問題と思われる。

各装置の相関については相関係数が 0.999 以上と非常に高く、測定結果の相互利用の可能性が示唆された。しかし、骨粗鬆症患者のように長期間の経過観察を必要とし、また骨密度のわずかな変化を捉える必要がある場合には、同一装置で測定を行うべきと考える。

骨密度を精度よく測定し、施設間で測定結果を相互利用するためには、装置添付の QA (quality assurance) ファントムによる daily QA だけでは不十分と考えられ、定期的に腰椎ファントムを用いた実験を施行し、精度管理に役立てることが必要である。

文 献

- 1) Kalender W: A phantom for standardization and quality control in spinal bone mineral measurements by QCT and DXA: design considerations and specifications, *Med Phys*, 19, 583-586, 1992.
- 2) Pearson J, Dequeker J, Henley M, Bright J, Reeve J, Kalender W, Laval-Jeantet AM, Ruegsegger P, Felsenberg D, Adams J, Birkenhager JC, Braillon P, Diaz Curiel M, Fischer M, Galan F, Geusens P, Hyldstrup L, Jaeger P, Jonson R, Kalef-Ezras J, Kotzki P, Kroger H, van Lingen A, Nilsson S, Osteaux M, Cano RP, Reid DM, Reiners C, Ribot C, Schneider P, Slosman DO, and Wittenberg G: European semi-anthropomorphic spine phantom for the calibration of bone densitometers: assessment of precision, stability and accuracy, *The European Quantitation of Osteoporosis Study Group*, *Osteoporosis Int*, 5, 174-184, 1995.
- 3) 荒井博史, 伊藤和夫, 永尾一彦, 古舘正
従: 骨塩定量測定装置 (XR-26, QDR-1000, DPX) の基本性能に比較検討, *映像情報 (M)*, 22, 1130-1134, 1990.
- 4) Blake GM, Perker JC, Buxton FM, and Fogelman I: Dual X-ray absorptiometry: a comparison between fan beam and pencil beam scans, *Br J Radiol*, 66, 902-906, 1993.
- 5) Faulkner KG, Gluer CC, Estilo M, and Genant HK: Crosscalibration of DXA equipment: upgrading from a Hologic QDR1000/W to a QDR2000, *Calcif Tissue Int*, 52, 79-84, 1993.
- 6) Frank H, Munz M, and Scherrer M: Evaluation of dual-energy X-ray absorptiometry bone mineral measurement-comparison of a single-beam and fan-beam design: the effect of osteophytic calcification on spine bone mineral density, *Calcif Tissue Int*, 56, 193-195, 1995.
- 7) Bouyoucef SE, Cullum ID, and Ell PJ: Cross-calibration of a fan-beam densitometer with a pencil-beam system, *Br J Radiol*, 69, 522-531, 1996.

Efficiency of Fan-Beam Type DXA (EXPERT) on Measurement of Bone Mineral Density: Multicenter Cross-Calibration

Health Research Center, Nagasaki University

Tomoko Nakata

Nobuko Ishii

Department of Radiology, Nagasaki University School of Medicine

Masako Ito

Kuniaki Hayashi

Nagasaki Memorial Hospital

Kazuhiro Hayashida

Nagasaki Saiseikai Hospital

Jun Kono

Nagasaki Kita Hospital

Toshimasa Fujishita

Abstract

Fan-beam type DXA (EXPERT) has been recently introduced for measuring bone mineral density (BMD), since scanning time is reduced with fan-beam type DXA in comparison with pencil-beam type DXA (DPX-L). In the present study, a phantom experiment was performed in four centers for evaluating its accuracy and precision. The precision of BMD measurement with a lumbar phantom was determined by three sets of EXPERT (A, B and C) and one set of DPX-L. The precision of BMD (% CV) was less than 1%, but EXPERT was relatively less efficient than DPX-L. The BMDs determined by three sets of EXPERT (A, B and C) closely correlated in each other ($r=0.99999$ in EXPERT A vs. B, $r=0.99977$ in EXPERT A vs. C and $r=0.99966$ in EXPERT B vs. C), and good correlation was observed between the value determined each of three sets of EXPERT (A, B and C) and the value determined by DPX-L ($r=0.99983$, 0.99990 and 0.99921 in DPX-L vs. EXPERT A, B and C, respectively). The BMD values ranged within 3% when the phantom was shifted from the center ($\pm 3\text{cm}$), and ranged within 4% when MIX-DP was added to a phantom.

The results indicate that fan-beam type DXA system can measure BMD with high precision, although the BMD values measured by EXPERT were affected slightly by positioning or physical constitution of patient. It is also possible that the values measured by fan-beam type DXA system are available for comparison in each other or comparison with the value measured by pencil-beam type DXA system.

(J Jpn Soc Bone Morphom, 7, 77-82, 1997.)

(本論文の要旨は第16回日本骨形態計測学会で発表した。)