

鋭角ファンビームを用いた骨密度測定装置がもたらすもの

GE ヘルスケア・ジャパン(株) Imaging 本部 Women's Health & X-ray 部

矢ヶ部 真理



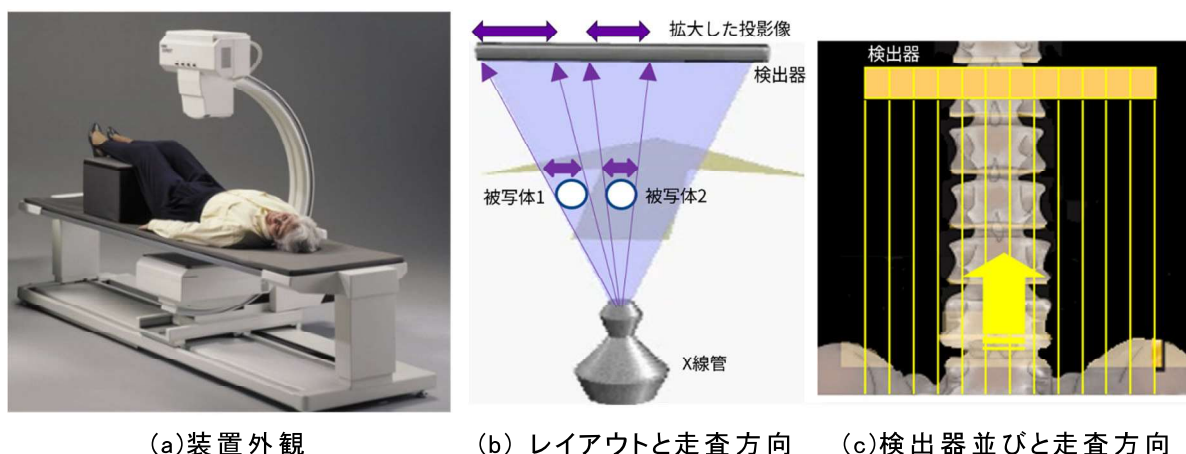
【はじめに】

日本は超高齢化社会を迎えており、それに伴う医療費の増大は深刻な社会問題の1つであると言える。骨粗鬆症患者数も増加の一途をたどっており、骨粗鬆症に起因する骨折を未然に防ぐことは、今後の日本の医療を考える上では重要な課題と思われる。現在、骨粗鬆症の診断や治療における判断基準として、二重エネルギーX線吸収測定 (DXA: Dual Energy X-ray Absorptiometry) 法による腰椎および大腿骨の骨密度測定がゴールドスタンダードとして確立しており、診療報酬として450点が付与されている。

DXA装置に求められることは、骨粗鬆症の兆候を確実にとらえる高い測定精度、継続的な治療効果を評価するための安定した計測 (再現性)、X線被ばくの低減、そして、増加の一途をたどる骨密度検査を効率的に行えることである。このような臨床的要求に対して、各社のDXA装置には様々な技術が用いられているが、本稿では当社が搭載している鋭角ファンビームを中心とした技術について解説する。

【測定精度の向上のために】

DXA装置に用いられている照射方法には、大きく分けて3つの方式がある。初期のDXA装置は、X線を線状に細く絞ったペンシルビーム方式という照射方式が採用されていた。ペンシルビーム方式は被ばくが少なく、対象骨の投影像に拡大誤差が発生しにくいいため、高い測定精度を実現できるというメリットがあった。ただし、そのビームサイズからスキャン時のスイープ回数が多くなるため、測定時間が非常に長くなるというデメリットがあった。このペンシルビーム方式の持つ課題に対して次に生み出されたのが、ワイドファンビーム方式である。幅広い検出器全体に扇状のX線を照射して1回のスイープで測定を行うワイドファンビーム方式は、測定時間が短縮できるため、一般的にも広く普及した。当社でも古くは、ワイドファンビーム方式を採用していた (図1)。



(a)装置外観

(b)レイアウトと走査方向

(c)検出器並びと走査方向

図1 ワイドファンビーム方式

しかしながら、ワイドファンビーム方式には大きな課題があった。扇状に X 線の広がりを持つワイドファンビーム方式では、投影される骨面積にどうしても幾何学的な拡大誤差が生じてしまい、結果として、骨密度 (BMD) の過小評価につながってしまう (図 1(b))。また、その骨面積の拡大誤差の程度は、被写体の位置、例えばベッド中心からの左右方向のずれや被写体厚に起因するベッド面からの高さ方向の違いによって、投影される骨面積が大きく変化することになる。つまり、1 回 1 回の測定精度だけではなく、ポジショニングや被検者の体格変化等によって、経過観察中の再現性にも影響がでることになる。そのため、操作者はシビアなポジショニングを求められることになるが、被検者の状態によってはそれが難しいことも多々ある。また、ワイドファンビーム方式では幅広い X 線束を覆う多くの検出素子が必要となるため、素子毎の感度の不均一性のリスクや検出素子の故障リスクが上がること、幅広い X 線照射によって不必要な部分への被ばくを増やし、かつ、周囲への散乱線も多くなるといった側面もあった (図 1(c))。骨密度検査は画像診断ではなく、高い測定精度が求められる定量的な検査である。そのため、ワイドファンビーム方式が持つこれらの課題を打破し、なおかつ、測定時間も短縮させるために生み出されたのが、鋭角ファンビーム方式である (図 2)。

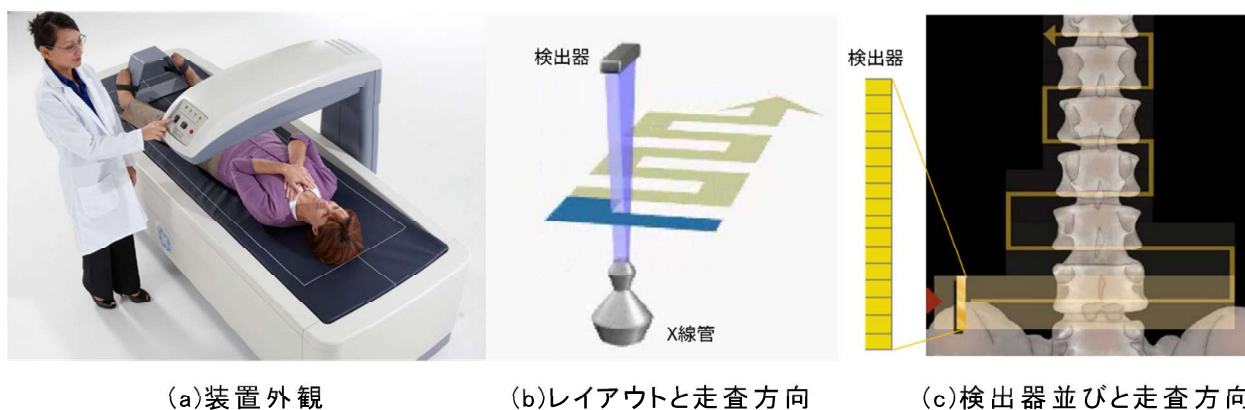


図2 鋭角ファンビーム方式

鋭角ファンビーム方式では、体軸横方向に対してペンシルビームのように細く絞られた X 線を使用することで、幾何学的な拡大誤差を抑制することができる。つまり、側弯症の腰椎撮影時や大腿骨近位部の撮影時等、被写体が X 線の線束中心からずれている場合でも測定誤差を抑えることができる。また鋭角ファンビーム方式では、体軸縦方向には検出器を複数配列することで幅を持たせ、対象骨を自動追従しながら必要最低限の範囲だけをスイープさせることで、測定時間や被ばく量も低減させることができる (図 2(b)(c))。

当社が体軸横方向のスキヤニングを採用した理由としては、検査部位の多くは骨が体軸縦方向に存在しているため、体軸方向のスキヤンと比較して、

- 1、照射野を最小限にできること
 - 2、体軸横方向のスキヤニングを行うことで、軟部組織、骨部境界の情報が適切に収集できること
- などが挙げられる。

各スイープはオーバーラップした形で行われ、最終的に各スキヤンで得られた画像に対して画像再構成が行われる。CT 等にも使用されているこの再構成技術は MVIR (Multi-View Image Reconstruction) と呼ばれ、体軸方向に生じた各スイープ間の歪みをなくし、正確な骨面積を提供する (図 3)。

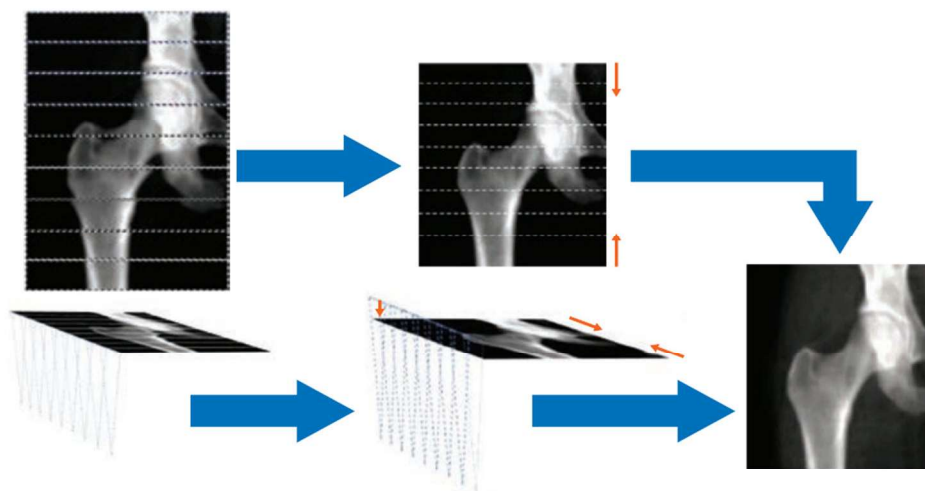


図3 再構成技術 MVIR(Multi-View Image Reconstruction)

【再現性の向上のために】

継続的な治療効果を評価するための安定した計測（再現性）を担保するために、DXA装置ではQA(Quality Assurance: 品質保証)プログラムの実施は重要である。QAプログラムは校正値を自動補正するもので、測定値と校正値の乖離がないかを確認するためだけのQC(Quality Control: 品質管理)とは異なる。

当社のDXA装置では、QAプログラムを実施するために専門業者や技術者を呼ぶ必要はなく、ユーザーによる日々のQAの実施が可能なため、常に安定した計測が可能である。専用のQAブロックには、低～高骨密度レベルまでの3種類のファントムと、低～高脂肪レベルの3種類のファントムが挿入されており、これらの基準物質に対してマルチポイントでの校正を行うことで、低値から高値まで測定値の直線性を正しく保つことができる(図4)。このようにQAがどのように行われているかを確認しておくことは、安定した計測のために重要な視点といえる。

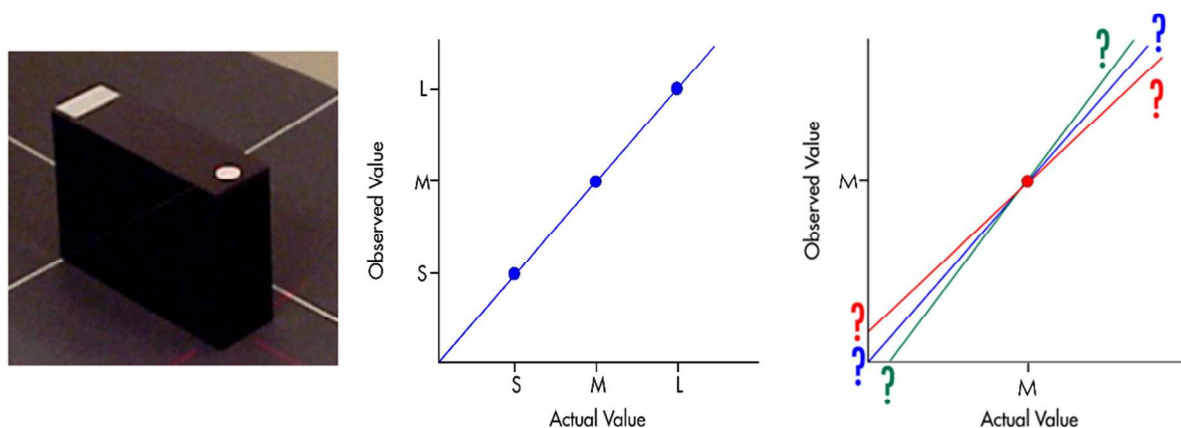


図4. QA(Quality Assurance: 品質保証)専用ブロック

また、安定した計測のためには検査毎のポジショニングの再現性も重要である。前述のとおり、ワイドファンビーム方式ではシビアなポジショニングの再現が求められていた。しかし、鋭角ファンビーム方式は対象骨の自動追従撮影を行うことで、検査毎の被写体位置に依存せず、継続的に安定した計

測を行うことができるため、経過観察中の再現性を高めることができる。

【被ばく低減のために】

DXA 法では、その名のとおり高エネルギーと低エネルギーの2種類のX線を用いて撮像する(図5)。高エネルギーのX線は透過力があるが、低エネルギーのX線は透過力が弱いために骨部で大きな減衰が起きる。その2つの差分をもとに、骨部でのX線減衰の度合いから骨量を求めることができる。実際のX線の照射部位には骨の前後に軟部組織が含まれるため、骨を含まない近接部位から得た軟部組織のX線減衰の情報をベースラインとして補正に用いている。最終的に、このベースラインとなる軟部組織と骨部の減衰の合計値を差し引くことで、骨量を計算している。

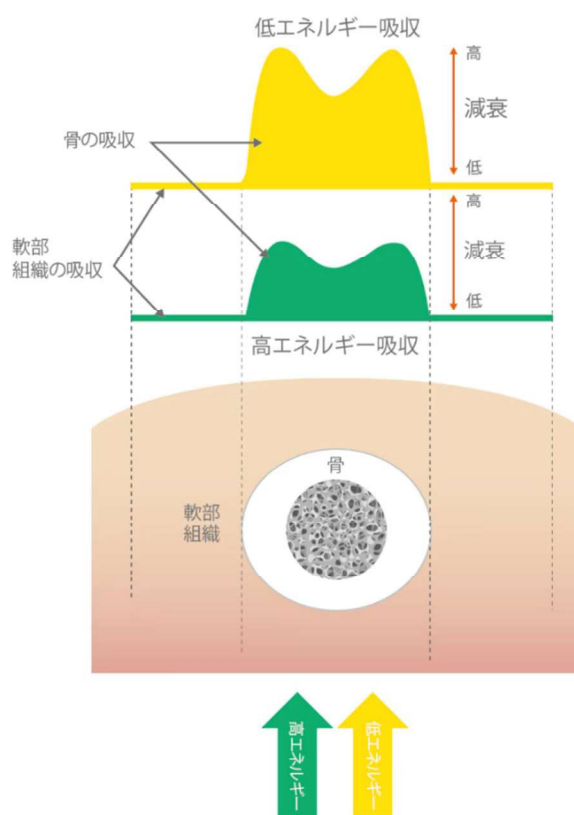


図5 DXA 法の原理

当社のDXA装置では、高エネルギーと低エネルギーの2種類のX線を取り出すために、K-エッジフィルタを使用している(図6)。連続したエネルギーを持つX線を、K-エッジフィルタに透過させることで余分な中エネルギー領域のX線をブロックし、必要な高エネルギーと低エネルギーのX線だけを被検者へ照射することができるため、他の方法に比べて被ばくを低下させることができるメリットがある。また、高エネルギーと低エネルギーの2つのX線を得るために高速で電圧を切り替える必要がないため、切り替え時のエネルギーの揺らぎを抑えることもでき、定量測定に適した常に安定したX線照射を使うことで計測精度もあがり、タイムラグなく2種類のX線を照射することができるのも、K-エッジフィルタの利点である。

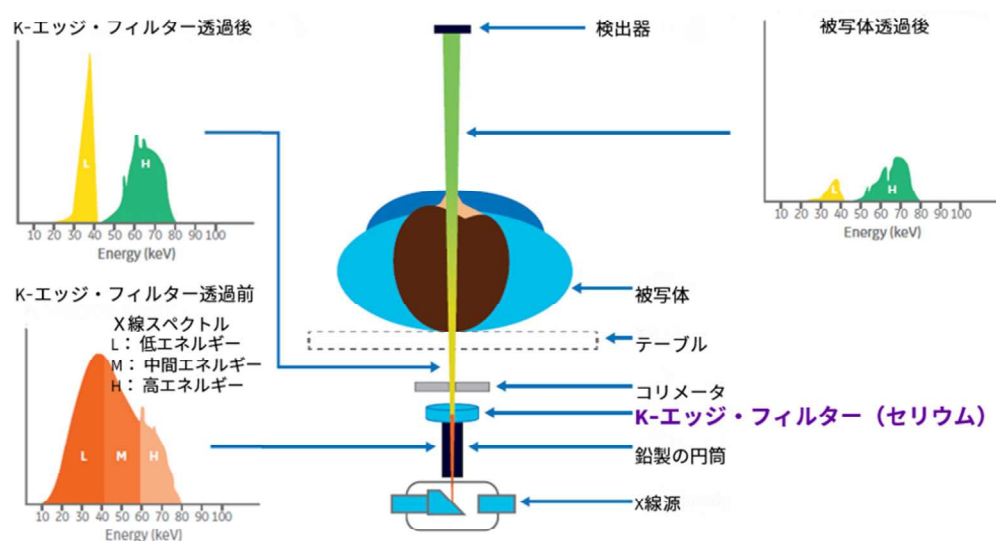
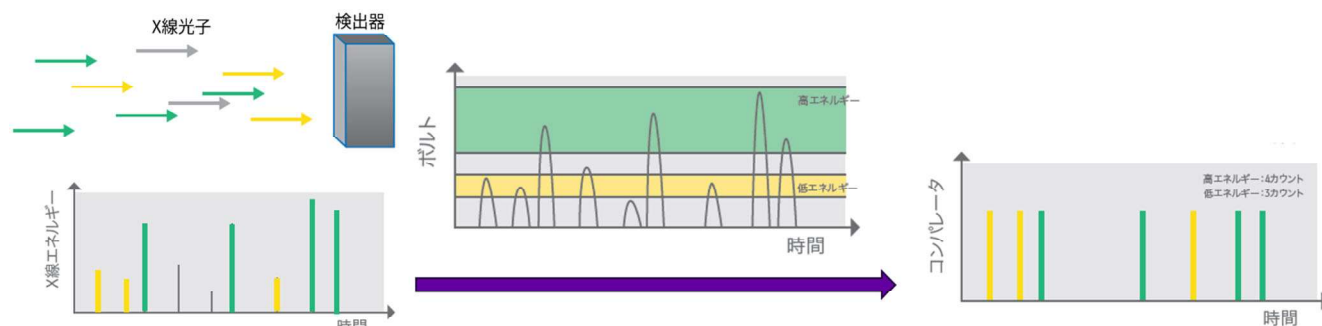


図6 K-エッジフィルタ

このK-エッジフィルタ透過後のX線の受け手となる検出器には、当社はフトンカウンティング（光子計測法）を採用している。フトンカウンティングとは、ある一定値以上のエネルギーを持ったX線光子数をカウントすることでデジタル信号化することのできる検出技術である。近年、被ばく低減に取り組むCTやPETなどにも商用化されてきた検出効率の高い検出技術である。フトンカウンティングでは、検出する高エネルギー帯と低エネルギー帯にそれぞれ上限と下限となるしきい値が設けられており、そのしきい値間のエネルギーをもつ光子数をそれぞれデジタルカウントする（図7）。そのため、検出される光子数には高/低のエネルギー混在が起きることがない。

X線の発生方式と検出方式には様々な方法があり、各方式には利点と欠点があるが、当社では発生器側のK-エッジフィルタと検出器側のフトンカウンティングの技術を組み合わせることで、それぞれがもつ利点を生かし、被ばく低減と測定精度の向上という臨床的効果を最大化している。



高エネルギーの光子（緑）と低エネルギーの光子（黄）数をデジタルカウントする

図7 フトンカウンティング

【検査効率向上のために】

ファンビーム方式による腰椎撮影では、腰椎と大腿骨撮影時にポジショニング変更を行う必要があった。対して、鋭角ファンビームを採用したDXA装置では、膝を伸展した仰臥位のまま、腰椎も大

腿骨近位部も連続して計測することができる。幾何学的拡大誤差や被写体位置による影響を受けない鋭角ファンビームの特性を生かした撮影方法である(図8)。これにより、1回のポジショニングで腰椎と大腿骨近位部を連続計測し、測定精度を下げることなく検査効率を向上させることができる。被検者もベッドに横たわるだけの安定した体位維持ができ、操作者と被検者ともに検査負荷が軽減できるメリットがある。



図8 鋭角ファンビームによる検査の流れ (OneScan機能使用時)

また、スキャン終了後は、解析範囲や骨領域、軟部組織などの領域設定や解析が自動で行われ、わずか数秒で計測結果とトレンドグラフが表示される。この一貫したフルオートの解析プログラムでは解析時間を短縮できるだけでなく、操作者のマニュアル操作の頻度が減り、操作者間の変動誤差を抑制できるため、長期的な経過観察にも役立つといえる。

【おわりに】

骨密度測定の世界標準であるDXA装置には、高い測定精度、常に安定した計測(高い再現性)、X線被ばくの低減、そして検査の効率性が求められている。それらの臨床的要求に対して、一概に同じDXA装置といえども、各社のDXA装置で使用されている技術は異なり、そのために各社に対してそれぞれの診断基準が設けられている。しかし、被検者の継続観察を支援するためのデータ移行の方法として、一部の異なる技術を持つ装置間では世界的にコンセンサスの取れた換算式があり、一般的な方法として普及している。医療技術は日々進化を遂げている。装置に搭載されている技術特性を理解し、臨床的な継続観察を維持しながら、新しい技術を取り入れていくことで、よりよい検査の実現につながる。

本稿では、長きにわたる骨密度測定装置の開発・製造の歴史をもつ当社が、その膨大な納入実績から生み出した技術とその変遷を紹介した。当社も引き続き業界をリードする技術開発を通じて、臨床に貢献していきたい。