

一般 X 線撮影におけるエネルギーサブトラクション技術の進化

富士フイルム(株) メディカルシステム開発センター
山田 雅彦



【はじめに】

一般X線撮影におけるエネルギーサブトラクション(以下ES)技術は、X線がデジタル化されたCRで実用化され、DRになり 2Shot法、1Shot 法へと進化している。長い間ESの主な対象部位は胸部であったが、最近では整形分野でも骨梁構造が見やすい骨画像を生成できるようになってきた。本稿では、ES技術の基本原則、技術の変遷と最新技術の概要、評価結果、臨床例を掲載する。

【基本原則】

ESは、物質によるX線吸収特性の違いに注目し、2種類のエネルギーを用いることで2種類の物質を分離する技術である。基本原則の模式図を図1(a)、図1(b)に示す。人体の軟部(Soft)と骨部(Bone)のX線吸収特性を図1(a)とした時のES計算方法を図1(b)に示す。2種類のエネルギーで撮影され観測された高エネルギー(HE)信号と低エネルギー(LE)信号に、適切な係数(1.5 や 10)を掛け合わせ差分することで、骨部(B)と軟部(S)とに分離することができる。

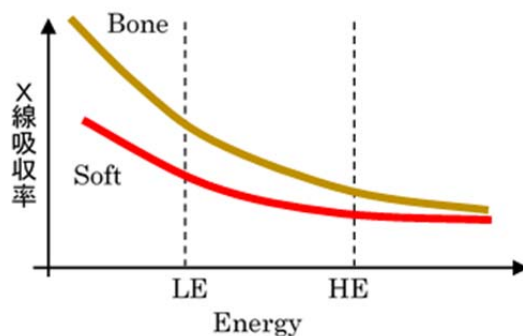


図1(a) ES 技術の基本原則 X線吸収特性

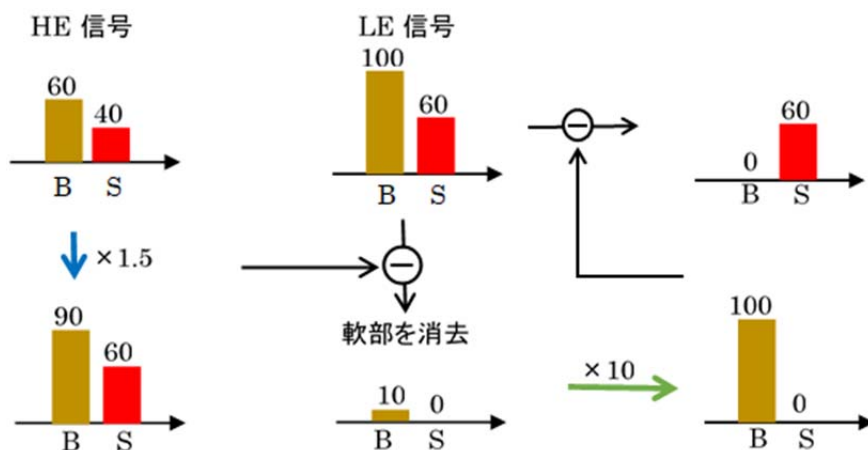


図1(b) ES 技術の基本原則 ES 計算方法

【技術の変遷】

ES技術には、2 Shot法と1 Shot法がある。2 Shot法は、異なるX線エネルギーで撮影するため画質が良いが、被ばく量が増加し、時間差による動きアーチファクトが発生する。1 Shot法は、検出器を積層してエネルギーを分離するため、2 枚目の検出器への到達線量が少なくなるため画質は低下するが、被ばくは抑制でき、動きアーチファクトは発生しない。

CRでは、イメージングプレート間に銅板を挟むことでエネルギー分離する 1Shot法を採用し、画質低下防

止のためノイズ抑制処理を開発した¹⁾(図2(a))。DRでは画像取得時間が短縮されたことから 2Shot法でエネルギー分離することで画質を改善し、体動補正技術を開発することでアーチファクトを低減した²⁾(図2(b))。最近では、DRでの 1Shot法の実現に向け、X線吸収特性が異なる2種類の検出器を積層することでエネルギー分離する方式(銅板なし)を採用している(図2(c))。

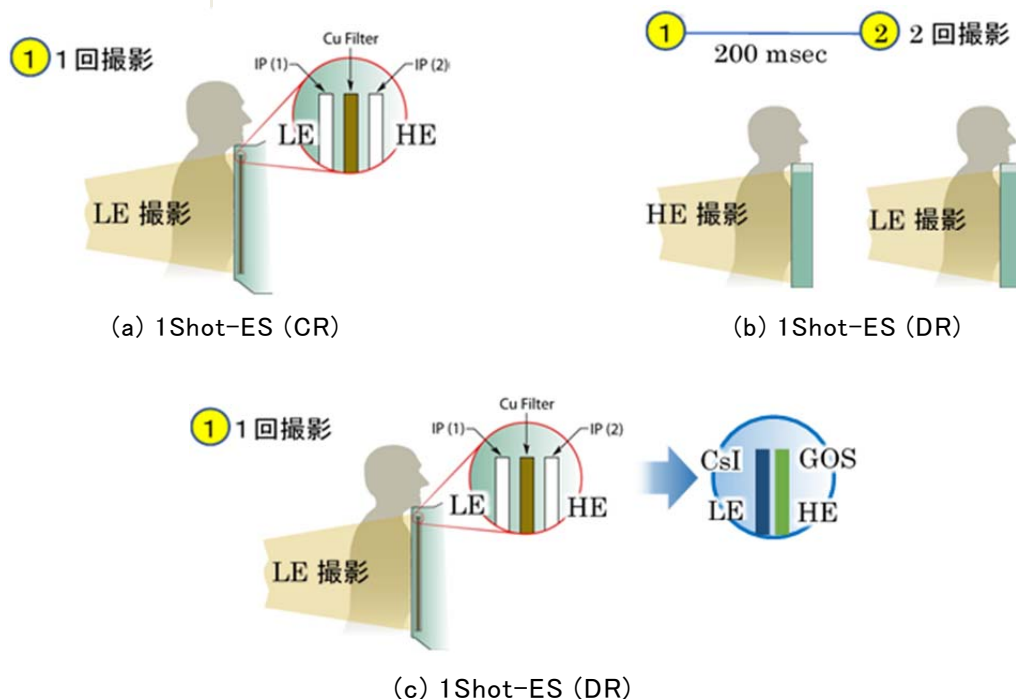


図2 ES 方式と装置構成

【最新ES処理の概要】

積層された2種類の検出器のシンチレータ特性と最新技術の概要を図3に示す。X線信号を光情報に変換する2種類のシンチレータ(CsI/GOS)の X線吸収特性の違いを活用し、LE(CsI)とHE(GOS)を取り出し差分した骨画像は図 3①となる。CsIを透過したわずかな X線しか GOSに届かないため HEの画質は大幅に低下し、LEとHEの差をとると、ノイズが支配的な骨画像となる。

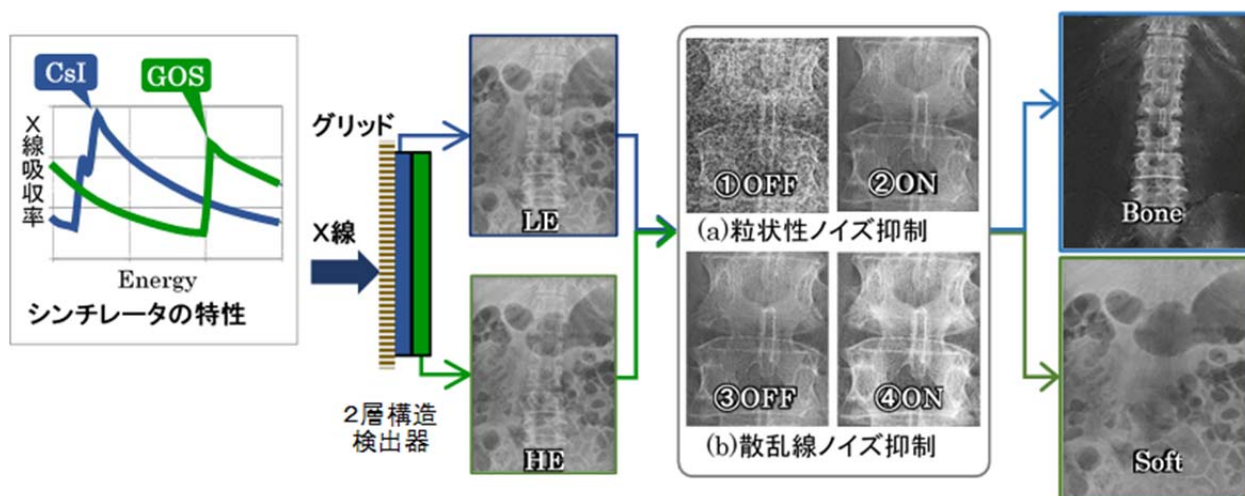
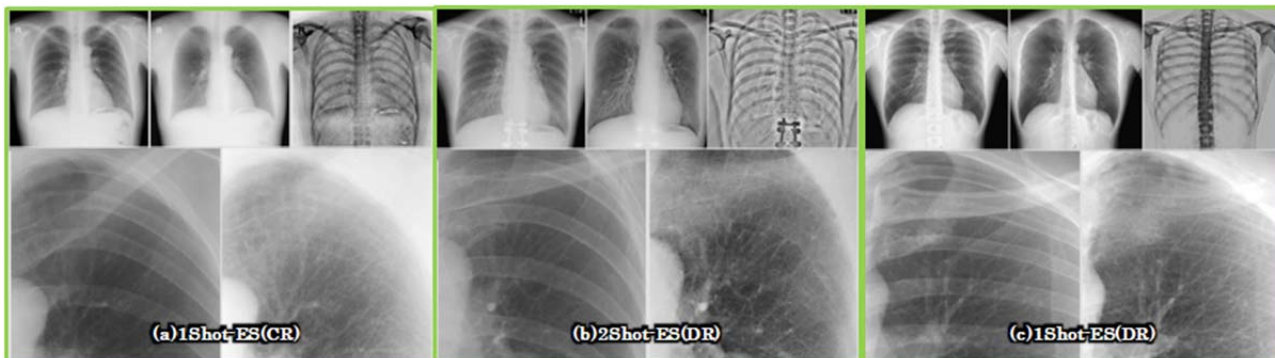


図3 シンチレータの特性と最新技術の概要

そのため、新たに(a)(b)のノイズ抑制技術を開発した。(a)X線ノイズや電気ノイズなどを抑制する目的の粒状性ノイズ抑制技術で、図3①から②となり、微細構造を観察しやすくする効果がある。(b)散乱線ノイズ抑制³⁾で、粒状性ノイズ抑制後の画像(図3③)から、④のように散乱線を除去することで骨コントラストを大幅に改善する効果を有する。撮影装置のキャリブレーションと両技術を組み合わせることで、胸部に加え胸椎/腰椎/大腿骨/骨盤の部位で高画質な骨画像・軟部画像を生成できるように進化している。



(a)(b)(c)とも左上から単純、軟部、骨部、左下から単純拡大、軟部拡大の順
図4 胸部画像の例

1 Shot-ES(CR)、2Shot-ES(DR)、1 Shot-ES(DR)の3種類の胸部画像(立位)を図4(a)(b)(c)にそれぞれ示す。(a)(b)(c)とも軟部画像では骨が消えているが、(a)(b)とも単純画像に比べ、やや不自然に強調された画像となっている。(c)は、単純画像から骨を取り除いたような自然な軟部画像となる。また骨画像に関しては、(a)や(b)に比べ(c)では椎体全体までよく描写されている。

【散乱線ノイズ抑制の効果(被写体:アクリル板)】

図3に示すように、被写体での散乱線をほぼゼロに除去するためにグリッドと散乱線ノイズ抑制技術を併用している。散乱線ノイズ抑制技術の効果を図5に示す。被写体での散乱線は、照射野面積に依存して変化するが、一次 X線は照射野面積によらず一定になる。その性質を利用して、横50cm×縦50cm×厚さ20cmのアクリルで照射野絞りの面積を変化させ出力画像を比較した。

グリッドのみのLE画像と、グリッドと散乱線ノイズ抑制技術を併用した軟部画像の平均プロファイルを図5(a)(b)に示す。照射野絞りサイズを20cm,30cm,40cmと変化させると、グリッドのみのLE画像は絞りサイズに依存して観測画素値が変化する(散乱線が残っている)が、併用方式の軟部画像は照射野変化に依存しない(散乱線がほぼ除去されている)ことがわかる。

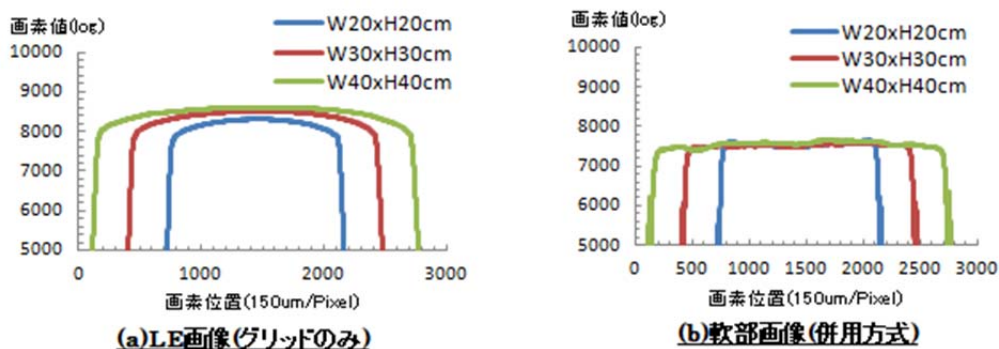


図5 プロファイルの比較(90kV、アクリル厚 20cm、自動濃度調整なし)

【軟部画像の特性(被写体:CDRAD ファントム+貝殻)】

軟部画像の特性を評価するために、Artinis Medical System 社製 CDRAD2.0 ファントム上に貝殻を置き、厚さ5cmのアクリルで挟み込んで撮影し、得られたLE画像と軟部画像(何れも画像処理済み)を同社解析ソフト V2.1で解析し、画質定量指標値(IQF_{inv})を算出した。

図6(a)にLE画像を示す。CDRADで評価に用いる各格子内に貝殻陰影が白く見えている。図6(b)に示す軟部画像では貝殻陰影が低減されていることがわかる。図6(c)に、貝殻なしのLE画像①、貝殻ありのLE画像②と貝殻ありの軟部画像③のIQF_{inv}結果を示す。

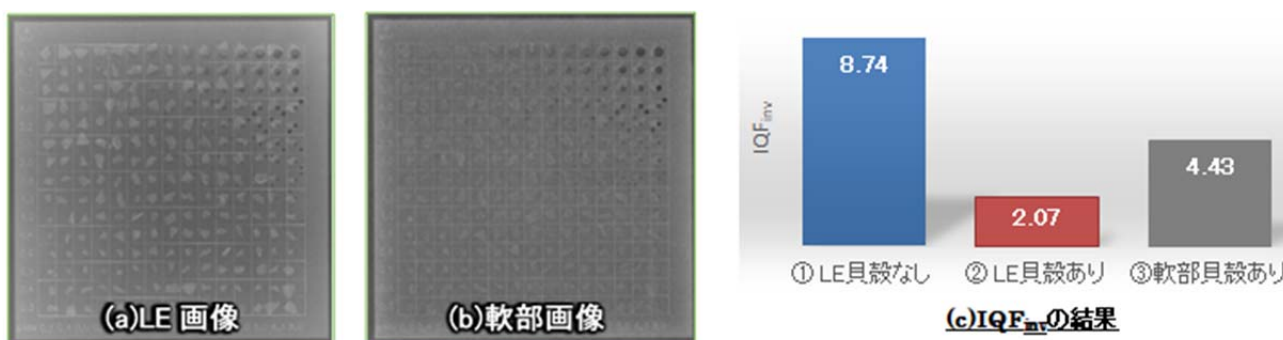


図6 CDRAD+貝殻の結果(120kV)

同線量で撮影された貝殻なしのLE画像①に対し、貝殻ありのLE画像②は、貝殻がノイズになるためIQF_{inv}が低下する。一方、貝殻を置いた場合でも軟部画像③になると、貝殻のノイズが除去されIQF_{inv}が改善する。なお、貝殻なしLE画像①と貝殻あり軟部画像③の差は、貝殻によるX線吸収により、貝殻がある評価領域で検出器への到達線量が低下した影響と考えられる。

【骨画像の特性(被写体:JIST2 ファントム+アクリル板)】

京都科学社製の均一性腰椎ファントム(DXA-J 41361-010、以下JIST2)の一部にアクリルを重ね、直接X線領域を鉛で遮蔽して撮影した画像(画像処理済み)を用いて骨コントラストを計測した。

図7(a)はJIST2のLE画像と骨コントラストを計測する領域(黄色/赤色枠)を、図7(b)に骨画像を示す。図の下側領域に0cm(なし)、2cm、4cmのアクリルを重ねて、(a)LE画像と(b)骨画像の骨コントラスト(上下の各領域の黄色と赤色の枠内平均値の差)を計測した結果を図7(c)に示す。

(a)LE画像では付加したアクリルが厚くなると骨コントラストが低下するが、(b)骨画像ではその影響が大幅に低減され、アクリル厚さによらずほぼ同じ骨コントラストを実現している(図7(c))。

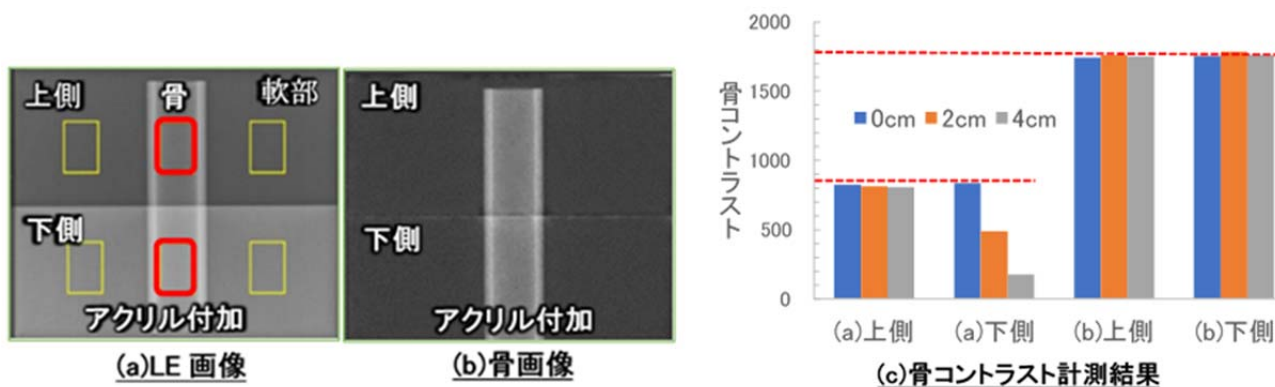


図7 JIST2 にアクリル付加撮影(90kV)

【骨画像の特性(被写体:人体)】

同じポジショニング(臥位)での腰椎に対する骨密度計測と1 Shot-ES(DR)撮影を医薬品開発業務受託機関(CRO)に委託して得たデータセット(約200名30~70歳、90kV)を用いて、第2/3/4腰椎の骨密度計測値(BMD)と、LE画像と骨画像(どちらも画像処理済み)の第2/3/4腰椎(手動で領域設定)の平均画素値を比較した。撮影画像の例とBMDと平均画素値の関係性を図8に示す。

BMDに対して、LE画像と骨画像の平均画素値の近似直線は、どちらも単調増加の関係となるが、BMDとの相関係数Rは、LE画像で0.409、骨画像で0.892となり、骨画像の平均画素値はBMDと強い相関があることがわかった。

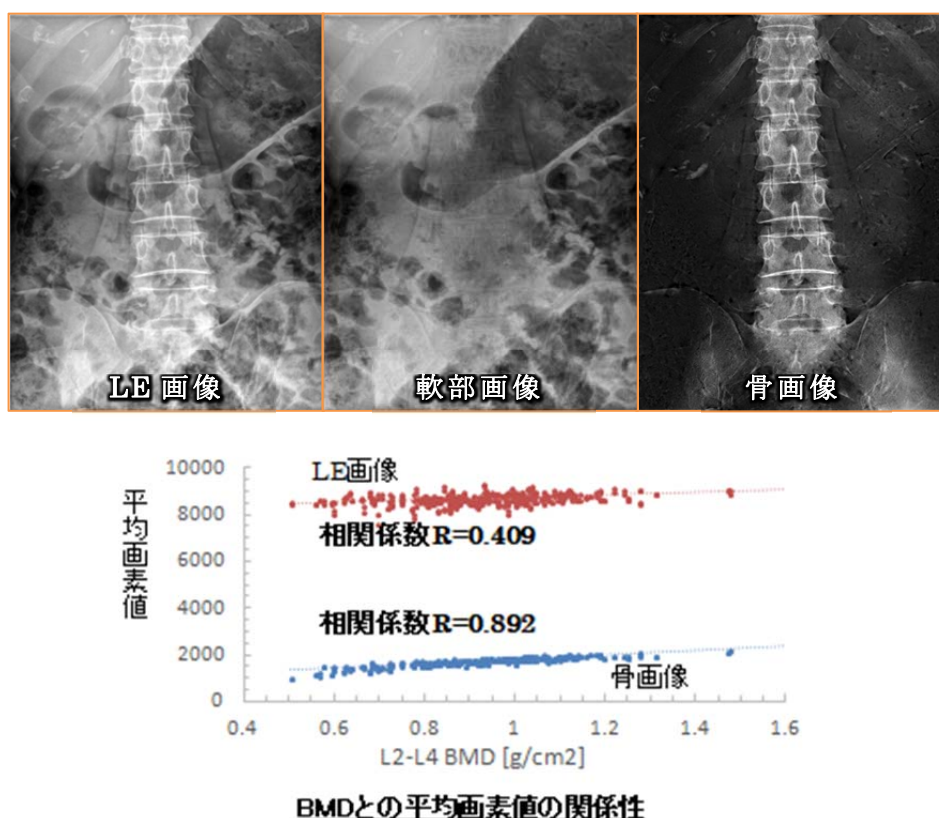
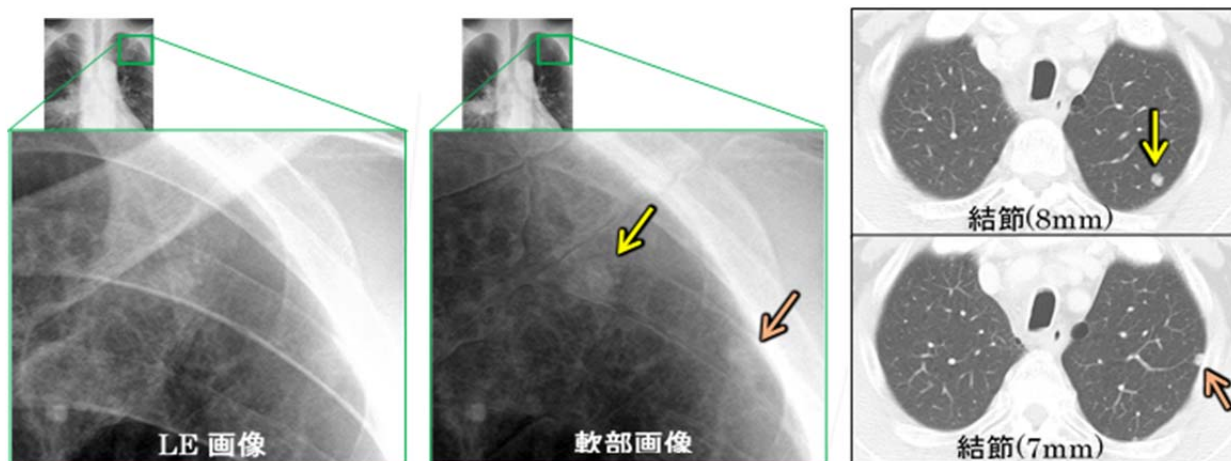


図8 腰椎画像例(LE/軟部/骨)とBMDと平均画素値の関係性(90kV)

【臨床画像の例】

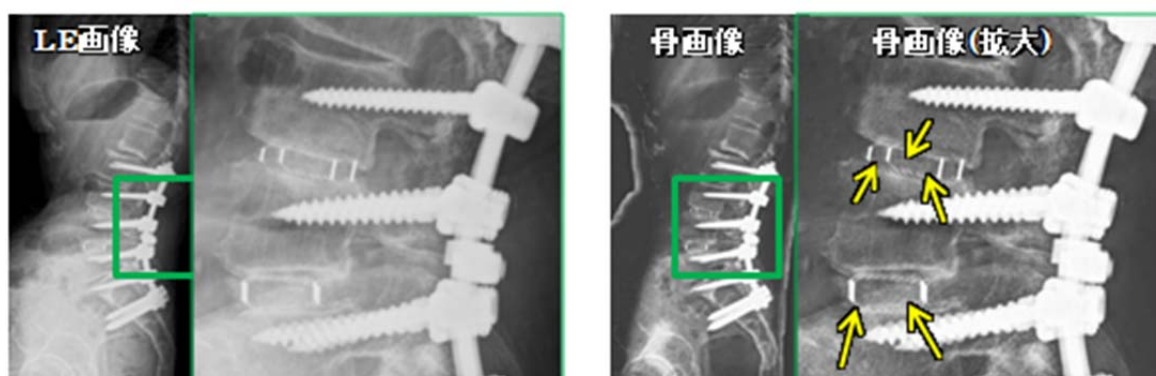
図9に胸部(立位)単純(LE)画像と軟部画像およびCT画像を示す。LE画像に比べ軟部画像では結節影(矢印)が明瞭に描出されている。これらの結節影は、該当断面のCT画像では、それぞれ8mm/7mm程度の結節であった。



肋骨が消えることで小さな結節陰影が見やすくなる

図9 胸部撮影の例

図10 に、後方椎体間固定術後のフォローアップ時の腰椎側面撮影(立位)の例を示す。骨部画像では、上下の椎体と同程度の白さの骨が椎間のケージ内部および周囲に形成され、上下の椎体とつながる骨癒合が進んでいる状態が見やすくなっている。



矢印のケージ付近で骨癒合が進んでいる状態が見やすくなる

図10 腰椎側面撮影の例

【おわりに】

人体を透過したX線のうち検出器を透過し捨てられていたわずかなX線情報を、2枚目の検出器で拾い上げ再利用するDRでの1Shot-ESは、本稿で紹介した新しい技術を適用することで、胸部・胸椎・腰椎・骨盤/股関節において高画質な軟部画像や骨部画像を生成できるように進化した。今後の臨床現場での活用/応用により、新しい価値が創出されることを期待する。

【参考文献】

- 1) 武尾英哉、志村一男、他:FCRの新しい画像処理：エネルギーサブトラクション FCR9501 ES/FCR DX-A: Fuji Medical Review No.4: p2-24:(1996).
- 2) Takahiro Kawamura, et al: Image registration method based on multiresolution for dual-energy subtraction radiography: SPIE Proceedings Vol. 8314: Medical Imaging 2012: Image Processing.
- 3) 川村隆浩、内藤慧、他:新画像処理「Virtual Grid(バーチャルグリッド)技術」の開発：X線検査の画質と作業性の向上:富士フイルム研究報告書 No.60： p21-27: 2015