臨床技術

フラットパネルディテクタを用いた
デュアルエネルギーサブトラクション法における
びまん性肺疾患の検出能の評価木口雅夫・北川康子・藤岡知加子・石風呂実
山口貴子・池田俊貴・古川隆志

広島大学病院診療支援部放射線部門

論文受付
2007年2月19日論文受理
2007年9月7日Code Nos. 253
532

緒言

わが国の放射線診断画像は、フィルム・スクリーンシステムからcomputed radiography (CR) システムの導入によるデジタル化へと急速に進んできた。さらにフラットパネルディテクタ (flat-panel detector: FPD) を搭載したデジタルX線装置が、1997年頃から臨床で使用され、約10年が経過した。FPDシステムの導入により、従来のフィルム・スクリーンシステムと比較し、検査時間の短縮化、高画質および多彩な画像処理等によって診断能が向上した¹⁻³⁾。一方胸部画像診断は、マルチディテクタCTの発達により、病変部の検出が

向上し、鑑別診断には濃度分解能が高いCTが有用である。しかし、胸部疾患において胸部X線画像は未だ欠かすことができないモダリティである。

近年、画像診断のデジタル化にともなって、コンピュータ支援診断 (computer-aided diagnosis: CAD)⁴⁻⁶⁾、経時差分像^{7,8)}、エネルギーサブトラクション⁹⁾など胸部X線画像診断の有用性が注目されるようになった。

今回われわれは、肺の腫瘍性陰影の検出に有用である¹⁰⁻¹²⁾ FPDのデュアルエネルギーサブトラクション法における、びまん性肺疾患の検出能について検討し

Evaluation of Improvement of the Detection of Interstitial Lung Diseases by Using the Dual-Energy Subtraction Radiography Method of a Flat-Panel Detector System

Masao Kiguchi, Yasuko Kitagawa, Chikako Fujioka, Minoru Ishifuro, Takako Yamaguchi, Toshiki Ikeda, and Takashi Furukawa

Department of Radiology, Hiroshima University Hospital

Received Feb. 19, 2007; Revision accepted Sept. 7, 2007; Code Nos. 253, 532

Summary

We investigated and evaluated the detection of simulated lesions in various interstitial lung diseases using the dual-energy subtraction radiography method and flat-panel detector (FPD) images. We obtained a FPD system (GE Revolution XR/d) and employed dual-energy 60 kV and 130 kV exposure techniques. Three types of lung lesions, namely, micro-nodule, ground-glass, and honeycomb patterns were simulated with interstitial lung disease on a chest phantom. Chest images with and without simulated lesions were exposed and compared with standard images and subtraction images. We carried out evaluations with and without subtraction images and performed the analysis by using receiver operating characteristic (ROC) analysis of detection. Results showed that the detection of interstitial lung diseases was significantly improved by the use of subtraction images. The area under the ROC curve (AUC) values of micro-nodule images obtained with and without subtraction images were 0.768 and 0.963, ground-glass images 0.670 and 0.917, and honeycomb images 0.768 and 0.996, respectively. A significant difference of $p < 0.05$ was accepted. The use of dual-energy subtraction radiography with a FPD improved diagnostic accuracy in detecting cases of multiple interstitial lung diseases and was considered useful.

Key words: flat-panel detector (FPD) system, dual-energy subtraction, receiver operating characteristic (ROC) analysis, interstitial lung diseases

別刷資料請求先: 〒734-8551 広島市南区霞1-2-3
広島大学病院診療支援部放射線部門 木口雅夫 宛

Fig. 1 Details of the dual-energy subtraction imaging procedure and the dual-energy X-ray spectrum.

Fig. 2 Dual-energy subtraction imaging algorithm.

た．模擬病変の形状・形態を変化させ，通常画像とサブトラクション画像を用いた胸部画像診断の有用性について評価した．

1. 方法

1-1 デュアルエネルギーサブトラクション法のアルゴリズム

Fig. 1にデュアルエネルギーサブトラクション法のアルゴリズムを示す．

デュアルエネルギーサブトラクション法は，1回の息止めで2種類の異なるエネルギーを用いて撮影する

高速撮影法である．まず，低管電圧側の撮影を行い，200msec未満で高管電圧側の撮影を行う．低管電圧側は60～80kV，高管電圧側は110～150kVとそれぞれの組み合わせの設定が可能である．

得られる3枚の画像は，高管電圧の標準画像とそれらのエネルギースペクトルの差を利用して脊椎・肋骨等を差し引いた軟部組織画像および骨組織画像である (Fig. 2)．

以下，今回の画像評価における実験系では軟部組織画像のみを使用し，これをサブトラクション画像とした．

a

b

c

Fig. 3 (a) Simulated micro-nodule images of acrylic beads.
(b) Simulated ground-glass images of loofah pieces.
(c) Simulated honeycomb pattern images of straw fragments.

1-2 使用機器

使用機器は、Revolution XR/α (GE横河メディカルシステム株式会社)、メディカルドライレーザーイメージャDRYPIX700α (富士フイルムメディカル株式会社)、ドライ画像記録用フィルムDI-HL (富士フイルムメディカル株式会社)、胸部ファントムPBU-α (株式会社京都科学)、拡散光濃度計MODEL 301 (富士フイルムメディカル株式会社)を使用した。

びまん性模擬病変には、小粒状影として3~4mmの多角形、円形のPolymethylmethacrylate : PMMA (アクリルビーズ, CT値 -320 (Fig. 3a)), 網状影とし

て40×30×25mmの含水のへちま (CT値 -680 (Fig. 3b)), 蜂窩状影として5×4×4mm ϕ のPolypropylene : PP (ストロー片 : CT値 -650 (Fig. 3c))を使用した。

1-3 画像収集

画像の撮影条件は、予備実験を行い決定した。胸部模擬腫瘍 (6mm ϕ アクリルビーズ) を貼付した胸部ファントムを低管電圧側 (60, 70, 80kV)、高電圧側 (110, 120, 130, 140, 150kV) をそれぞれ組み合わせて15種類の画像を得た。撮影条件は、デジタルディテクタ ヨウ化セシウム (CsI) アモルファス-シリコン

Fig. 4 Evaluation of the ROC curve of micro-nodule.

(a-Si)間接変換方式、ディテクタピクセルサイズ $200\mu\text{m}$ 、焦点サイズ 0.6mm 、総濾過 2.7mm Al 、付加フィルタなし、固定グリッド(格子比13:1、格子密度78本/cm、中間材質Al)、撮影距離180cmとした。システム感度は、われわれが通常胸部撮影に使用している auto exposure control (AEC) RS250で撮影した。得られたサブトラクション画像において、肺野部血管・模擬腫瘍コントラスト、縦隔部心陰影の均一性についてシェッフェの対比較の芳賀変法を用い、診療放射線技師7名で比較検討した。この結果より、各管電圧の組み合わせにおいて当院で最も評価が高かった低管電圧側60kV (29.5keV)、高管電圧側130kV (42.2keV)の組み合わせを使用した。

胸部ファントムに3種類のびまん性模擬病変(小粒状影、網状影、蜂窩状影)を肺抹消血管に沿って、臨床的に病変が存在すると思われる場所に貼付した。胸部ファントムを低管電圧側60kV、8.65mAs、高管電圧側130kV 2.15mAs (AEC: RS250)で撮影し、得られた標準画像とサブトラクション画像を縮小率67%ハードコピーにて出力した。肺野部濃度は、当院で胸部画像診断に用いられている濃度に調整し、Window Width一定、Window Level可変で中肺野部濃度を標準画像 1.20 ± 0.03 、サブトラクション画像 1.00 ± 0.03 とした。3種類のびまん性模擬病変を含む画像75枚、模擬病変を含まない画像75枚の合計150枚を作成した。

1-4 視覚評価におけるびまん性模擬病変の検出能

3種類のびまん性模擬病変の検出能について、連続確信度法を用いて観察を行った。標準画像のみ、標準画像+サブトラクション画像の2種類について、病変

部の検出能を診療放射線技師7名(経験年数10年以上3名、8年以上3名、5年未満1名)で観察した。観察方法は、模擬病変ごとに行い、はじめに標準画像のみで全画像を、続いて標準画像+サブトラクション画像を観察した。各模擬病変の観察は1日ごとに行った。その結果を用いてreceiver operating characteristic (ROC)解析を行った。ROC曲線下面積(the area under the curve (AUC)値の計算には、シカゴ大学カートロスマン放射線研究所・Metz教授らのROCKIT¹³を用いた。また、統計的有意差検定には両側ペアードt検定を用い、 $p < 0.05$ を統計的有意差ありとした。

2. 結果

2-1 小粒状影における検出能

小粒状影における検出能は、標準画像と比較して、標準画像+サブトラクション画像の方が全体的に高い病変検出評価が得られた。

ROC解析のAUC値と標準偏差値は、標準画像 0.768 ± 0.073 、標準画像+サブトラクション画像 0.963 ± 0.026 であり、 $p < 0.05$ で検出能に有意差が認められた(Fig. 4)。

2-2 網状影における検出能

網状影における検出能は、小粒状影の評価と比較して全体的に評価が低かったが、それぞれの画像間に検出能に有意差が認められた。

標準画像に比較して、標準画像+サブトラクション画像は全体的に高い評価が得られた。

ROC解析のAUC値と標準偏差値は、標準画像 0.670 ± 0.090 、標準画像+サブトラクション画像

Fig. 5 Evaluation of the ROC curve of ground-glass.

Fig. 6 Evaluation of the ROC curve of honeycomb patterns.

0.917±0.046であり、 $p < 0.05$ で検出能に有意差が認められた(Fig. 5)。

2-3 蜂窩状影における検出能

蜂窩状影における検出能は、標準画像に比較して、標準画像+サブトラクション画像の方が有意に評価が高くなった。

標準画像と比較して、標準画像+サブトラクション画像は、全体的に高い評価が得られた。

ROC解析のAUC値と標準偏差値は、標準画像0.768±0.084、標準画像+サブトラクション画像0.996±0.007であり、 $p < 0.05$ で検出能に有意差が認められた(Fig. 6)。

デュアルエネルギーサブトラクション法が特に有用

であった臨床画像を供覧する。

- ・症例1：胸膜下網状影と気管支壁肥厚

胸膜下区分の網状繊維化濃度と気管支壁肥厚が、標準画像よりもサブトラクション画像の方がより鮮明に描出されている(Fig. 7)。

- ・症例2：右肺S8のすりガラス陰影

右肺S8のすりガラス陰影の斑点状の分布が前後肋骨の重なりの影響を避けることによって、標準画像よりもサブトラクション画像の方がより鮮明に描出されている(Fig. 8)。

3. 考 察

びまん性肺疾患は、肺胞性病変と間質性病変の二つに分類されるが、間質性病変が占める割合が大きい。

Fig. 7 Reticular shadow and bronchial thickening.
Subpleural distribution of reticulo-fibrous density and bronchial wall thickening is better and more clearly seen on the subtraction image than with the standard method.

Fig. 8 Patchy distribution of ground-glass density in segment 8 of the right lung.
By avoiding the influence of both anterior and posterior aspects of the ribs, ground-glass density is more clearly depicted by the subtraction method than by the standard method.

従来の胸部単純X線写真はX線像の重なった画像であり、読影において、肋骨による障害陰影の影響が大きい。さらに、濃度コントラストの低さもびまん性肺病変検出に影響を及ぼす。

現状では、びまん性肺疾患の診断には、CT画像、特に高分解能CTで病変部の分布を診断することが必要不可欠である^{14, 15)}。しかしながら、びまん性肺疾患の診断には、簡便で全体像が把握でき、かつ安いコストで迅速に診断できるという理由で胸部単純X線写真が評価されており、異常が見つかることが多い¹⁶⁾。

今回検討したエネルギーサブトラクション法は、X

線エネルギーの違いによって、体内の臓器のX線吸収係数が異なることを利用した画像処理法である。特にX線吸収の大きい骨陰影を除去して、軟部陰影のみを画像化することにより診断情報が拡大される。また、石灰化の検出能にも優れ、腫瘤状陰影の質的診断にも有用である¹⁶⁾。つまり、標準画像にサブトラクション画像を加えて診断することにより、CT画像を必要としていた胸部疾患の検出において、従来の胸部単純X線写真以上の診断情報を提供できる。また、CT検査施行時よりも被ばく線量の低減が期待できる。

CRを使用した1回撮影によるエネルギーサブトラ

クション法は、2枚のイメージングプレートの間に銅板を挟み、その前後のエネルギー差を利用した方法である。この有用性について上村、小林らが報告しているが^{17, 18)}、この方法には、撮影間の呼吸性移動がないという利点と、銅板通過前後のX線エネルギースペクトル差が11keVと小さいという欠点がある¹¹⁾。

一方、FPDを使用したデュアルエネルギーサブトラクション法は、低管電圧60～80kV、高管電圧110～150kVの組み合わせが可能で、エネルギースペクトル差も60kV/120kVの組み合わせで23keVと大きいいため、1回撮影デュアルエネルギーサブトラクション法よりもサブトラクション効果が高い¹¹⁾。

比較した3種類の模擬病変、小粒状影、網状影、蜂窩状影ともに標準画像単独よりも標準画像とサブトラクション画像を組み合わせた方が全体的に高い評価が得られ、 $p<0.05$ で模擬病変部の検出能に有意差が認められた。

標準画像とサブトラクション画像を合わせて診断することにより、びまん性肺疾患の検出能が高くなることが認められた。

しかし、今回の研究では、胸部ファントムに模擬病変を付加して評価したため、観察画像が絶えず同一条件で表示されるという問題点がある。臨床条件下では、肺野の形状、体型・体格の違い、散乱線の影響、心拍動、体動などさまざまな因子の影響を受けるため、ファントムスタディよりも若干検出能が下がることも懸念される。

2回撮影によるエネルギーサブトラクション法は、X線を2回曝射する。表面入射線量は、われわれが通常胸部単純X線撮影に使用しているシステム感度RS250と比較すると、60kV/120kVの組み合わせで0.221mGyとなり、FCR950(富士フイルムメディカル株式会社)の120kV撮影と比較してCRより約40%低い値であった。このことから、デュアルエネルギーサブトラクション法は、通常の1回照射の胸部単純X線撮影よりも被ばく低減の可能性が示唆される。

しかし、サブトラクション画像は、2回曝射による

撮影時間差により、心拍動、体動によるミスレジストレーションが起こる可能性が大きい。また、サブトラクション処理を行うため、ノイズを多く含んだ画像となる。このため、ECGトリガーを使用した撮影法の導入、または、高感度撮影モードとノイズリダクションフィルタ処理によりサブトラクション画像の画質低下を抑えた高速・低線量撮影法など撮影方法・処理方法について検討が必要である¹⁹⁾。

今後の展開として、FPDデュアルエネルギーサブトラクション画像を用いた経時差分処理を行い、これをCADと組み合わせることにより、さらなる診断能の向上が期待される。

4. 結 語

FPDを用いたデュアルエネルギーサブトラクション法におけるびまん性肺疾患の検出能について基礎的検討を行った。

デュアルエネルギーサブトラクション法(標準画像+サブトラクション画像の組み合わせ)は、びまん性肺疾患において従来の高管電圧撮影による胸部単純X線画像単独よりも病変検出能が高く、診断能の向上が期待される。

謝 辞

本研究に際し、日本放射線技術学会の国際研究集会派遣会員として助成をいただきました。藤田透前学会長をはじめ学術交流委員、会員の皆様に厚くお礼申し上げます。

また、技術・情報提供をいただいたGE横河メディカルシステム株式会社 守部芳生氏、植田智子氏に感謝いたします。

本論文の要旨は第60回日本放射線技術学会総会学術大会(2004年、横浜)およびThe 90th Scientific Assembly and Annual Meeting of the Radiological Society of North America(RSNA2004, Chicago)にて発表した。

参考文献

- 1) 岸本健治: 一般撮影におけるフラットパネルディテクタの評価. 日放技学誌, 58(4), 455-461, (2002).
- 2) 若松 修: フラットパネルディテクタの臨床応用 2. 一般撮影系フラットパネルディテクタ(FPD)の使用経験. 日放技学誌, 58(1), 34-36, (2003).
- 3) Kump KS, Shi S: IIテクニカルリポート 1. 静止画撮影におけるFPDシステム. INNERVISION, 18(4), 12-15, (2001).
- 4) 桂川茂彦, 杜下淳次, 石田隆行, 他: 胸部単純写真のCAD. 日放技学誌, 58(3), 332-336, (2000).
- 5) 真田 茂, 佐藤浩史, 小林 健, 他: 肺紋理を対象とした画像位置合わせ法 - 胸部X線画像の時間的差分法 -. 日放技学誌, 58(3), 398-404, (2000).
- 6) 杜下淳次, 桂川茂彦, 土井邦雄: 間質性肺病変のコンピュータ分析におけるグレイレベル・ランレングス解析の応用. 日放技学誌, 58(3), 384-390, (2000).
- 7) 真田 茂, 小林 健, 吉田めぐみ, 他: 胸部X線エネルギーサブトラクション画像を対象とした時間的差分法による微細病巣陰影の強調. 日放技学誌, 58(3), 428-435, (2000).
- 8) 佐々木康夫: 胸部CR差分像によるコンピュータ支援診断. 臨床放射線, 51(1), 31-39, (2006).
- 9) 小林 健, 阿保 斉, 真田 茂, 他: 高度画像処理による胸部1回撮影エネルギー差分法の臨床的有用性の検討. 日放技学誌, 58(3), 491-495, (2000).
- 10) Sabol JM, Avinash GB, Nicolas F, et al.: Development and characterization of a dual-energy subtraction imaging system for chest radiography based on CsI: TI amorphous silicon flat-panel technology. Medical Imaging 2001: Physics of Medical Imaging, Proc. SPIE, Vol.4320, 399-408, (2001).
- 11) Avinash GB, Jabri KN, Uppaluri R, et al.: Effective dose reduction in dual-energy flat panel x-ray imaging: technique and clinical evaluation. Medical Imaging 2002: Image Processing, Proc. SPIE, Vol.4684, 1048-1059, (2002).
- 12) Alvarez RE, Seibert JA, and Thompson SK: Comparison of dual energy detector system performance. Med Phys, 31(3), 556-565, (2004).
- 13) 白石順二: デジタル時代の画像評価の基礎と応用 1. デジタル画像診断がもたらす効果の判定とROC解析. 日放技学誌, 58(1), 15-19, (2002).
- 14) 土井 修: びまん性肺疾患診断へのアプローチ. 画像診断別冊 5, 87-88, (1988).
- 15) 伊藤春海, 泉 孝英, 北市正則, 他: 間質性肺病変のCT像. 画像診断 別冊 5, 87-88, (1988).
- 16) 村田喜代史, 高橋雅士, 新田哲久, 他: びまん性肺疾患における単純写真の役割. 画像診断, 22(4), 404-412, (2002).
- 17) 上村良一, 高島 力, 木船孝一: 肺癌の単純X線診断. 癌の臨床, 41(12), 1305-1313, (1995).
- 18) 小林 健: Digital Radiography(Fuji Computed Radiography)を用いた肺結節影内石灰化の検出に対する検討 - 胸部1回エネルギー差分法骨画像を用いて -. 日本医放会誌, 55(9), 638-645, (1995).
- 19) Kiguchi M, Kitagawa Y, Fujioka C, et al.: Quantitative evaluation of dose reduction on image noise using dual energy subtraction system. ECR2006 Book of Abstracts, 367, (2006).

図表の説明

- Fig. 1 デュアルエネルギーサブトラクション法の画像収集手順とX線エネルギースペクトル
- Fig. 2 デュアルエネルギーサブトラクション法のアルゴリズム
- Fig. 3 (a)アクリルビーズによる小粒状影の画像
(b)へちまによる網状影の画像
(c)ストロー片による蜂窩状影の画像
- Fig. 4 小粒状影画像のROC曲線による評価
- Fig. 5 網状影画像のROC曲線による評価
- Fig. 6 蜂窩状影画像のROC曲線による評価
- Fig. 7 胸膜下網状影と気管支壁肥厚
胸膜下区分の網状繊維化濃度と気管支壁肥厚が, 標準画像よりもサブトラクション画像の方がより鮮明に描出されている.
- Fig. 8 右肺S8のすりガラス陰影
斑点状の分布が前後肋骨の重なりの影響を避けることによって, 標準画像よりもサブトラクション画像の方がより鮮明に描出されている.