

一般 X 線撮影における散乱線補正技術 Virtual Grid®

富士フイルム(株)
川村 隆浩



【はじめに】

一般 X 線撮影では発生した散乱線による画質の低下が診断上問題になるケースがある。散乱線を除去しコントラストを高めるために、一般的に金属製フィルタ「グリッド」が使用されている。一方、グリッドを使用する場合、患者や撮影状態により画像に濃度ムラを生じやすく、また撮影部位や条件に応じてグリッドの種類を変えるなど、使用時に注意が必要である。そのため、病棟内のベッド、車椅子、救急などのポータブル撮影においては、濃度ムラを避けるため、敢えてグリッドを使用せずに撮影され、結果として画像のコントラストが低くなることもある。

この課題を解決するため、従来より、グリッド未使用の画像から散乱線による画質低下の影響を除去する散乱線補正技術が開発されてきた。当社は、X線とデジタル画像に対する解析技術を組み合わせることで散乱線成分を再現する散乱線推定技術を開発し、撮影画像から推定された散乱線成分を除去することで、グリッドを使用しなくても画像のコントラストを高めることができる散乱線補正技術：「Virtual Grid」(画像処理ソフトウェア)を実用化した¹⁾。図1に Virtual Gridを適用した例を示す。グリッドを使わずに撮影した画像(図1(a))は、グリッドを使って撮影した画像(図1(b))と比べると、散乱線の影響でコントラストが低下している。グリッド未使用画像(図1(a))に Virtual Gridを適用した結果が図1(c)の画像である。適用前に比べてコントラストが改善していることがわかる。本稿では、散乱線がグリッドに入射したときの物理現象を説明し、様々な要因で発生する散乱線成分に対する Virtual Gridの有効性について解説する。



図 1 Virtual Grid の効果

【散乱線とグリッドに関する物理現象】

1. 散乱線の特徴

X線が被写体に照射されると一次線と散乱線が発生する。一次線は被写体内を直進し、散乱線は、X線と物質の相互作用によって被写体内で方向を変えながら進む。散乱線のエネルギーや方向は、照射されたX線のエネルギー、被写体の厚さや物質(骨、筋肉、脂肪)等、様々な条件に応じて変化する。散乱線の発生量は、被写体の物質と X 線照射野の大きさを一定とすれば、被写体の厚さと照射された X 線のエネルギーに依存して変化する事が知られている²⁾。X線検出器と同じ大きさになるようにX線照射野を設定した場合の、被写体透過後の散乱線量と一次線量の比 Scatter-to-Primary

Ratio(STPR)を図2に示す¹⁾。STPRは被写体の厚さに大きく依存して変化し、被写体が厚いほど散乱線の割合が多くなる。また、撮影管電圧が高くなるほど、散乱線の割合が増える傾向がある。

2. グリッドによる散乱線除去の効果

グリッドは、散乱線が一定の方向性を持たないことを利用して、斜め方向に入射するX線を吸収することにより散乱線を除去している。その結果、グリッドは一次線透過率が高く、散乱線透過率が低くなり、グリッド透過後のX線は一次線の割合が多くなる。

グリッドによってコントラストが改善するメカニズムを図3に示す。グリッドがない状態を(A)とすると、グリッド使用時は一次線と散乱線がそれぞれ低減され、状態(B)になる。X線量は光学濃度に変換される際に対数変換されるため、状態(A)や状態(B)は、それぞれ状態(A')と状態(B')に変換される。状態(A)(B)で観測されたX線量の差(幅)は、光学濃度に変換された際に画像のコントラストとなる。状態(B)は、グリッドにより散乱線が低減され線量差(幅)は小さくなるが、全体としてのX線量も低減されるため、対数変換で強調されコントラストが増幅される。

X線量子ノイズはX線量の平方根に比例して増加する。グリッド透過後はX線量が少なくなるため、X線量子ノイズも低減する。しかし、X線量から光学濃度への対数変換(図3)により、低線量域ほどX線量子ノイズが強調されやすくなる。そのため、低線量域ほど粒状度が悪くなり、同一照射条件でグリッドを使用すると、グリッド未使用時に比べ粒状度は悪化する。

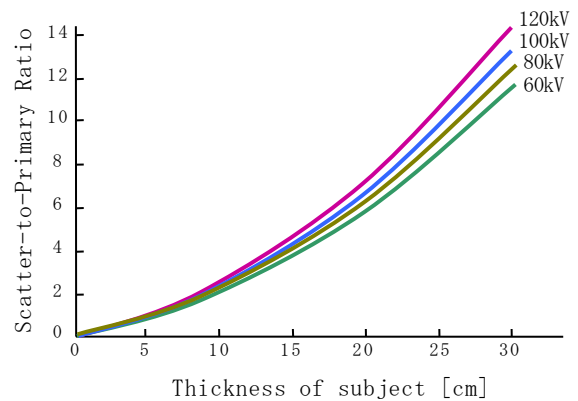


図2 被写体厚とSTPRの関係

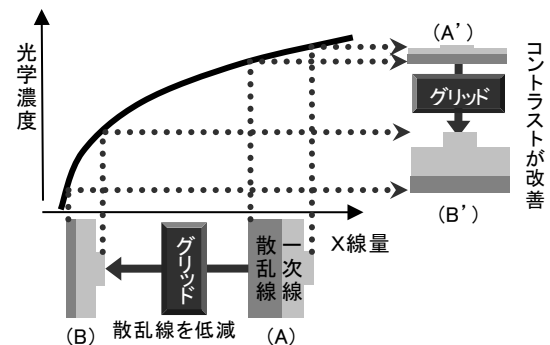


図3 散乱線低減によるコントラスト改善

【Virtual Grid の概要】

グリッド透過後のX線量は、被写体透過直後のX線量がグリッドの一次線透過率と散乱線除去率に応じて減弱され、検出器で観測される。Virtual Grid は、グリッド透過後のX線量を計算によりシミュレートする「コントラスト改善処理」と、コントラスト改善によって強調されるノイズを低減する「粒状改善処理」から構成されている。

1. コントラスト改善処理

コントラスト改善処理は、様々な物理的な情報と画像情報から散乱線量を推定する散乱線算出処理と、算出した散乱線量を補正するグリッド効果算出処理により、画像のコントラストを改善する。

散乱線算出処理は、対象となる被写体の厚さを求めることで散乱線量を推定する。被写体

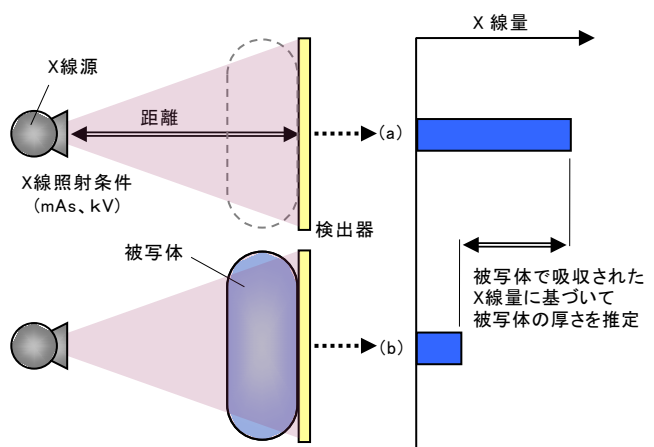


図4 被写体厚の推定方法

の厚さの推定方法を図4に示す。まず、X線照射条件と、X線源から検出器までの距離を用いて、被写体が存在しなかった場合に検出器へ到達するX線量(a)を推定し、観測された画像の画素値から被写体透過直後のX線量(b)を算出する。(a)、(b)の値から被写体で吸収されたX線量を算出することにより、被写体の厚さが推定できる。この被写体の厚さデータを用いて、散乱線量を算出する。

図5を用いてグリッド効果算出処理の概要を説明する。図5左側にグリッドを使用した場合を、右側にVirtual Gridの場合を記載する。被写体透過直後のX線に含まれる散乱線量は、散乱線算出処理により算出し、被写体透過直後のX線量は画像の画素値から求めることができるため、被写体透過直後のX線に含まれる一次線量は引算で求めることができる。グリッド効果算出処理では、推定された被写体透過直後の一次線量と散乱線量、および、グリッドの一次線透過率と散乱線除去率を用いて、グリッド透過後の一次線量と散乱線量をそれぞれ算出する。被写体透過直後の一次線量と散乱線量を正しく推定できれば、グリッド使用時と同じような印象の画像になる。

図3で示したように、グリッドによるコントラスト改善のメカニズムと同様の考え方で、Virtual Gridでも、散乱線量が低減するため、コントラストが改善される。

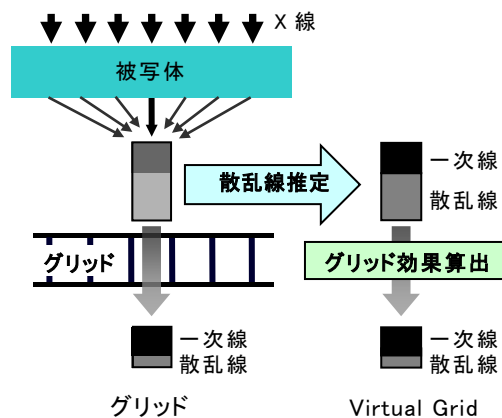


図5 グリッド効果算出処理の概要

2. 粒状改善処理

粒状に影響するX線量のゆらぎを図6に、画像上の粒状度(X線量のゆらぎを対数変換)を図7に示す。X線量のゆらぎは、20cm厚の一般的なアクリルを撮影し、検出器で検出された露光量を表す画素値の root mean square (RMS)を、粒状度は、上記画素値を対数変換した後のRMSとした。なお、1.3mAsのグリッドなし撮影のRMS値で正規化し、相対RMSとした。RMSは値が小さいほどノイズが少なく、粒状度が良いことを示す。

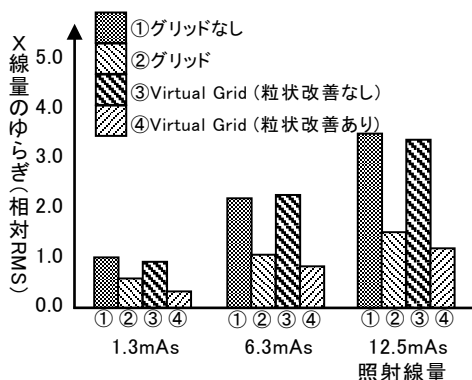


図6 照射線量とX線量のゆらぎとの関係

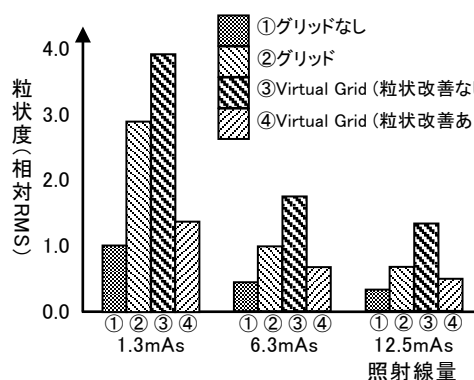


図7 照射線量と粒状度の関係

X線量子のゆらぎがX線量の平方根に比例して増加するため、X線量が増えるとX線量のゆらぎが増加する(図6)。前節で述べたように、グリッドによって散乱線が低減された場合、検出器に到達するX線量が減少するため、グリッド未使用時に比べ、X線量のゆらぎは小さくなる(図6①②)。しかし、散乱線補正がコントラスト改善のみの場合、X線量のゆらぎはX線が検出器へ照射されるときに発生するため、ゆらぎはグリッドなし画像と同程度で(図6①③)、グリッド使用時より大きい(図6②③)。また、X線量から光学濃度への対数変換(図3)により、低線量域でのゆらぎが強調されるため、グリッド使用時の粒状度はグリッド未使用時と比べて悪化する(図7①②)。散乱線補正によって散乱線量を低減すると、対数変

換によりX線量のゆらぎが大きく強調され(図7①③)、グリッド使用時よりもさらに粒状度が悪化する(図7②③)。

したがって、散乱線補正にも、グリッドがX線量のゆらぎを低減させている効果と同等以上の、粒状度を改善する機能が必要となる。粒状改善処理は、ノイズ成分を抽出して低減することにより、画像の粒状度を改善する処理である。ノイズは構造を持たないランダムな成分とみなすことができる。具体的には、画像内の複雑な構造をパターン認識し、構造に応じたフィルタを適用することでノイズ成分のみを抽出し、被写体構造に重なったノイズ成分を除去している。粒状改善処理の効果を図6④と図7④に示す。グリッド以上に粒状度を改善できている。

胸部の臨床画像に対して粒状改善処理を適用した結果を図8に示す。粒状改善処理を適用した図8(c)は、適用前の図8(a)と比較して、粒状度が大幅に改善されていることがわかる。図8(a)から低減したノイズ成分(図8(b))には被写体の構造が視認されず、信号成分の劣化が生じていないことがわかる。

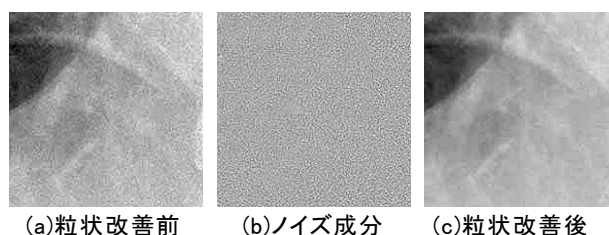


図8 粒状改善処理の適用結果

【画質評価】

1. 信号検出能

グリッド撮影画像と Virtual Grid を適用した画像の信号検出能を、Artinis Medical Systems 社製 CDRAD 2.0 ファントムと同社解析ソフト V2.1 を用いて比較した。CDRAD ファントムを 10cm 厚の亚克力で挟んだ条件で、各撮影線量における画質指標 IQF inv の計測結果を図 9 に示す¹⁾。IQF inv は、値が大きいほど総合的な画質が高く、より微細で淡い信号が描出できていることを意味する。

相対 IQF inv は、10mAs で撮影したとき、グリッド使用画像の IQF inv が 1.0 となるように正規化した値である。このグラフから、グリッド使用時に比べて、グリッド未使用時の IQF inv が低くなり、散乱線により画質が低下していることがわかる。

一方、グリッド未使用画像に Virtual Grid を適用すると、IQF inv はグリッド使用時よりも高くなる。これは、散乱線量推定によるコントラスト改善と、被写体構造と無関係なノイズの低減による粒状度改善との相乗効果によると考えられる。撮影線量を減らすと IQF inv は低下するが、どの線量域でも Virtual Grid を適用した画像は、グリッド撮影画像に比べて高い画質レベルとなる。

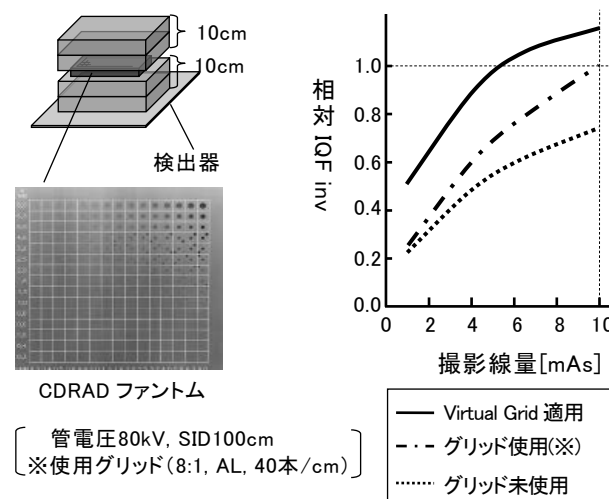


図9 評価条件と画質指標 IQF inv 計測結果

2. X線入射角度依存性

胸部ファントムを用いて、グリッド撮影画像と Virtual Grid を適用した画像に対して、X線斜入時のコントラストを評価した。X線の入射角度を0度、5度、10度に設定して同一照射条件で胸部ファントムを撮影し、縦隔濃度と右上肺野濃度および左上肺野濃度の差をコントラストとして計測した。図10上段にグリッド撮影画像、下段に Virtual Grid 適用画像の、入射角度に対するコントラスト計測結果を示す。ここで、0度のときのコントラストが 1.0 になるように正規化した。グリッド撮影画像では、5度、10度の

とき右上肺野、左上肺野のコントラストが変化して左右差が大きくなった。10度のとき、5度と比べて左右差が減少するものの、左右ともにグリッドのカットオフの影響を受けて検出器への到達線量は減少していた。Virtual Grid 適用画像では、入射角度を変えてもコントラストの変化は小さかった。

図11に、入射角度を変化させたときのグリッド撮影画像と Virtual Grid適用画像を示す。グリッド撮影画像は、5度のとき左右の肺野濃度に差が生じているのがわかる。10度のとき、0度、5度と比べて肋骨や肺血管などのコントラストが低下した。これは、グリッドの鉛箔によるフィルタ効果の影響により、グリッド透過後のX線エネルギーが相対的に高くなったためと考えられる。Virtual Grid適用画像は、入射角度を5度、10度にしても、肺野濃度や、肋骨・肺血管などのコントラストに大きな変化は生じなかった。

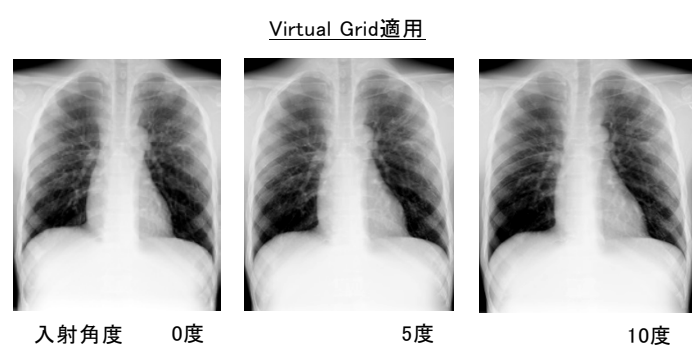
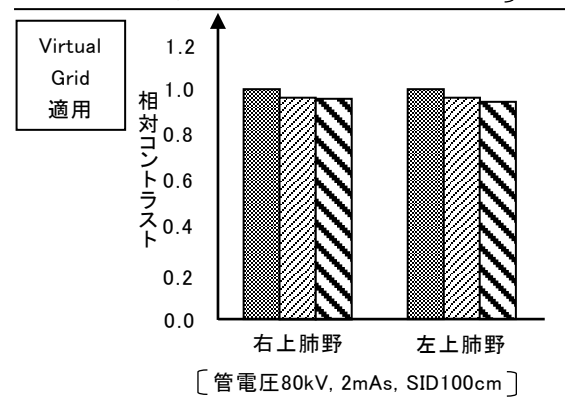
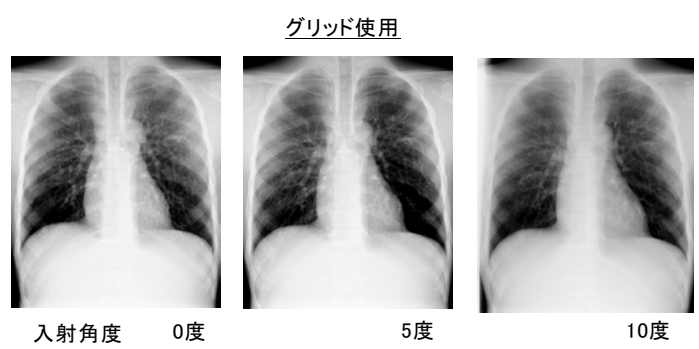
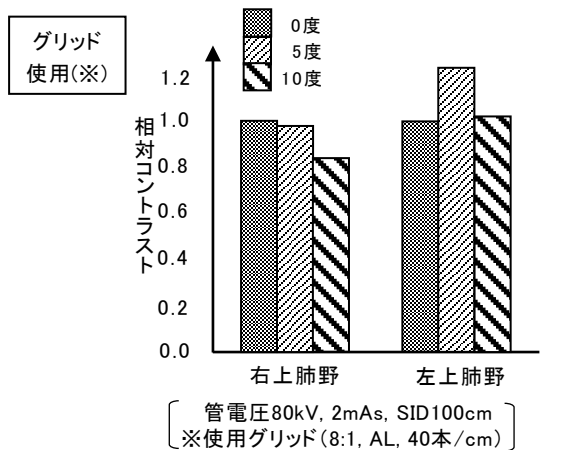


図10 入射角度と肺野コントラストの関係

図11 X線斜入の画像への影響

【臨床画像への適用例】

撮影部位毎に被写体内で発生する散乱線の状態が変わるため、当社の Virtual Grid では、部位毎に散乱線モデルを最適化することによって、全身の部位に対応している。臨床画像に Virtual Grid を適用した結果を図12に示す。体型、体質やポジショニングなどの要因により被写体内での散乱線の特徴が変化するため、グリッドと Virtual Gridを適用した画像が全てのケースで完全に一致することはないが、Virtual Grid適用画像は、グリッド未使用画像に対してコントラストが改善し、グリッド撮影画像と同じ印象の画像となっている。

前節で説明したグリッド効果算出処理では、グリッドの一次線透過率および散乱線除去率を用いて画像処理するため、グリッドの格子比を変えた画像を生成することができる。ポータブル撮影では、斜入の影響から高グリッド比のグリッドを使用することが難しい。Virtual Gridは斜入の影響がないため、高グリッド比に相当するコントラスト改善が可能である。Virtual Gridでは仮想グリッド比を 1:1から 20:1ま

で選択でき、細かいコントラスト調整もできる様に設計した。図13に胸部画像に Virtual Grid のグリッド比を変えて適用した結果を示す。図13(b)は図13(a)をグリッド比2:1相当にて、図13(c)はグリッド比8:1相当にて、図13(d)はグリッド比20:1相当にて処理した画像である。グリッド比が大きくなるほど、コントラストがより改善している。

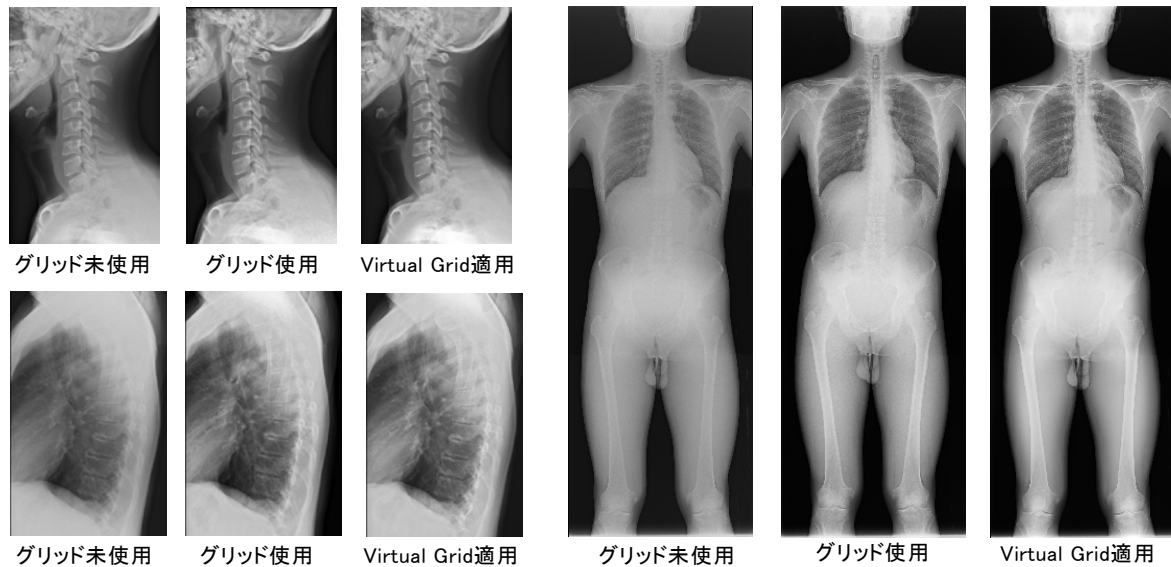


図12 臨床画像へのVirtual Grid適用例

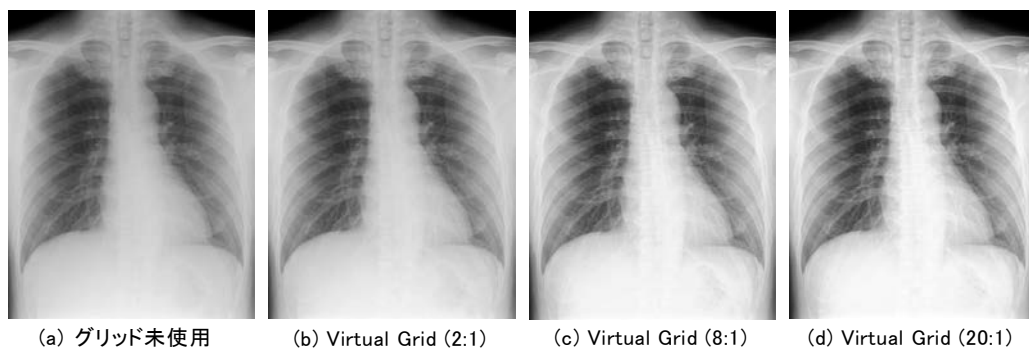


図13 Virtual Gridのグリッド比を変えて適用した例

【まとめ】

Virtual Gridは、グリッドのようにコントラストを改善し、グリッド使用時に問題となるX線斜入によるコントラスト変動を抑制することができる。

Virtual Gridは、これまで多くの施設で導入され、胸腹部のポータブル撮影に使用されている。全身の部位に対応した Virtual Gridが、今後、さらに広く利用され、ポータブル撮影など、複雑で手間のかかる X線撮影の業務効率化と画質向上に貢献することを期待する。

【参考文献】

- 1) 川村隆浩・内藤慧・岡野佳代・山田雅彦, 「新画像処理「Virtual Grid(バーチャルグリッド)技術」の開発」, 富士フイルム研究報告書 No.60, pp.21-27 (2015).
- 2) Bushberg, JT, Seibert, JA, Leidholt, EM, and Boone, JM, "The Essential Physics of Medical Imaging," Williams & Wilkins, Baltimore, MD (1994).