



# 逐次近似応用再構成法と逐次近似再構成法における物理評価と視覚評価について：フィルター補正逆投影法との比較

*Physical evaluation and Visual evaluation of adaptive iterative reconstruction method and model based iterative reconstruction method: Comparison with filtered back projection*

平野 高望<sup>1), 6)</sup>, 安田 光慶<sup>1), 2)</sup>, 鈴木 航<sup>3)</sup>, 高橋 俊行<sup>2), 3)</sup>, 崔 昌五<sup>4)</sup>, 加藤 京一<sup>2), 5)</sup>

1) 昭和大学病院 放射線技術部 2) 昭和大学大学院 保健医療学研究科 3) 昭和大学江東豊洲病院 放射線技術部  
4) 昭和大学藤が丘病院 放射線技術部 5) 学校法人昭和大学 統括放射線技術部 6) 杏林大学大学院 保健学研究科

**Key words:** model based iterative reconstruction method, Physical evaluation, filtered back projection

## 【Summary】

We performed image physical evaluation and visual evaluation of filtered back projection (FBP), adaptive statistical iterative reconstruction (ASiR) and Veo. We measured Task-based MTF and noise power spectrum (NPS). There were no significant task-based MTF values between ASiR 50% and Veo, and that value and strength for noise reduction were both reduced in ASiR. The NPS values of ASiR and Veo methods were lower than those of FBP. Veo was lower than FBP in the middle to high spatial frequency range, and increased from FBP in the low spatial frequency range. The visual evaluation rankings were no significant difference between Veo and ASiR 50% was reduced.

## 【要旨】

本研究はfiltered back projection (FBP), adaptive statistical iterative reconstruction (ASiR) およびVeoの物理評価と視覚評価を行った。比較項目はTask-based MTFとnoise power spectrum (NPS) である。ASiRのTask-based MTFは強度を上げると低下し、VeoはASiR 50%と同等であった。ASiRのNPSは高周波数が低下した。Veoは中～高空間周波数領域ではFBPより低減し、低空間周波数では増加した。視覚評価ではVeoとASiR 50%は有意差が認められなかった。

## 緒言

近年、computed tomography (CT) 分野における iterative reconstruction (IR) 法の利用が多くなってきている。IR法には、逐次近似を応用した逐次近似応用再構成法 (IR応用法) があり、二通り存在している。これら IR応用法は優れたノイズ低減効果を発揮する一方、見た目の違和感や低コントラスト領域の検出能は向上しないとの報告がある<sup>1-5)</sup>。しかし、これらの

報告はIR応用法だけの評価であり、IR法による報告はされていない。GE社で開発されたIR法は、焦点サイズ・検出器セルサイズ・再構成画像素子サイズ、およびそれらを通過するX線束などの、CT装置そのものが持つX線の幾何学的情報を考慮した逐次近似再構成であり、従来のfiltered back projection (FBP) と比較し密度分解能と空間分解能が向上するとされている。

CT画像の物理特性は、解像特性とノイズ特性から評価される。近年、IR法の解像特性は、Richardら<sup>6)</sup>により提唱されたTask-based MTFが主となっている。その理由は、従来のワイヤ法のような高コントラストは人体では想定し難いが、Task-based MTFは臨床におけるコントラスト領域での解像特性が測定できるからとされている。またノイズ特性において、standard deviation (SD) はIR法の画像には適さないとされており、noise power spectrum (NPS) の評価を推奨している<sup>2, 6)</sup>。NPSの測定方法には仮想スリット法・2次元法・radial frequency法が存在するが、radial frequency法は再現性が高い測定方法とされている<sup>7)</sup>。これらIR法の解像特性に適しているとされているTask-based MTFと、ノイズ特性の中で再現性が高いとされているradial frequency法によるNPSを測定し、物理特性を比較評価することを第一の

Takaho Hirano<sup>1), 6)</sup>, Mitsuyoshi Yasuda<sup>1), 2)</sup>,  
Wataru Suzuki<sup>3)</sup>, Toshiyuki Takahashi<sup>2), 3)</sup>,  
Syougo Sai<sup>4)</sup>, Kyoichi Kato<sup>2), 5)</sup>

- 1) Department of Radiological Technology, Showa University Hospital
- 2) Graduate School of Health Sciences, Showa University
- 3) Department of Radiological Technology, Showa University Koto-Toyosu Hospital
- 4) Showa University Fujigaoka Hospital
- 5) Department of Radiological Technology, Showa University
- 6) Graduate School of Health Sciences, Kyorin University

Received October 25, 2017; accepted October 26, 2018

目的とする。

第二の目的として、物理特性の結果を基に腹部単純CT画像における肝実質と肝腫瘍の辺縁の明瞭さに着目し視覚評価を行う。

## 1. 方法

### 1-1. 使用機器

Multi detector raw CT (MDCT) 装置はGE Healthcare社製の64列マルチスライスCT装置Discovery750HDを使用した。解像特性ファントムとして低コントラストファントムを作成した。低コントラストファントムをFig.1に示す。京都科学社製CTテストファントムJCT型のアクリル製円柱状ファントムの中心に、CT値が約40 Hounsfield unit (HU)のポリウレタン製円柱ファントムを固定した。固定したポリウレタン製円柱ファントム周囲は約20HUのCT値になるようヨード造影剤を希釈した水溶液を封入し、コントラスト差が約20HUになるように設定した。今回のコントラスト設定は、視覚評価で腹部単純CT画像での肝実質と肝腫瘍のコントラストを想定したためである。

ノイズ特性ファントムには、GE Healthcare社製のCT装置に付属しているquality assurance (QA) ファントムの水ファントム(直径200mm)を使用した。

画像解析には、national institutes of health (NIH)のImageJ (Ver.1.48v)と日本CT技術学会より提供されているCTmeasure (Ver.0.95d)を用いた。

### 1-2. 比較検討項目・再構成方法

本研究における検討項目は、解像特性であるTask-based MTF、ノイズ特性であるNPSおよび視覚

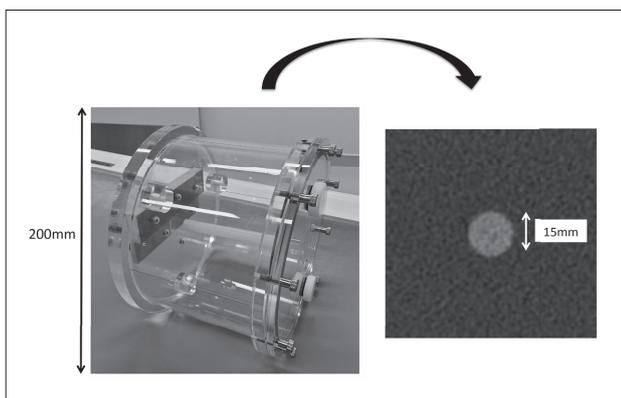


Fig.1 low contrast phantom

評価とした。撮影した画像はFBP、IR応用法であるadaptive statistical iterative reconstruction (ASiR) およびVeo (second version) で再構成をして比較検討を行った。ASiRの強度はASiR 50%・ASiR 100%とした。

### 1-3. 解像特性

低コントラストファントムをスライス面に対して垂直に配置し、回転中心に設置し撮影した。撮影条件は管電圧:120kV, Noise Index (NI):13.5 (2.5mm再構成), 回転速度:0.6s/rot., 再構成スライス厚:2.5mm, ピッチファクター:0.984, ビーム幅:40mm, スキャン方式:ヘリカルスキャン, 収集検出器:0.625×64列, scan field of view (SFOV):Large FOV, display field of view (DFOV):300mm, マトリックス数:512×512, 再構成関数:standardである。

解析方法を以下に示す。Task-based MTFは、CT measureを用いてRadial edge法で算出した。Task-based MTFではフォトンノイズが測定値に与える影響が大きいため、解析画像はノイズの影響を極力少なくする目的で20枚の加算平均画像を使用した。加算画像のバックグラウンドは2.5HUとした。加算平均画像の円柱標的物体に接するように正方形region of interest (ROI)を設置した。edge spread function (ESF)は正方形ROIの中心座標を補正し、プロファイルを取らせ設定したROIの中心から、円形物体のエッジを横切るプロファイル曲線を放射方向に算出し、算出されたプロファイル曲線を平均して求めた。求められたESFを微分することでline spread function (LSF)を求め、バックグラウンドの減算を行いZeroingした。ZeroingしたLSFをフーリエ変換することでMTFを算出した。なお、LSFのバックグラウンド減算は裾野の平坦部分を視覚的に決定し、Zeroingは標的以外の信号がなくなり平坦になり始める位置を視覚的に決定し、その外側を0とした。

### 1-4. ノイズ特性

水ファントムをスライス面に対して垂直に配置し撮影した。撮影条件は管電圧:120kV, NI:13.5 (2.5mm再構成), 回転速度:0.6s/rot., 再構成スライス厚:2.5mm, ピッチファクター:0.984, ビーム幅:40mm, スキャン方式:ヘリカルスキャン, 収集検出器:0.625×64列, SFOV:Large FOV, DFOV:300mm, マトリックス数:512×512, 再構成関数:standardである。

NPSはradial frequency法で解析した。水ファントム中心に128×128ピクセルのROIを設置し、2次元トレンド除去および2次元高速フーリエ変換で全周方向のNPSを平均した。撮影回数は10回とし、その平均値をNPSの値とした。

### 1-5. 視覚評価

使用した臨床画像は2016年10月から2016年11月まで当院で撮影され、HCCと診断された症例20例（男性13例、女性7例、平均年齢は69±9.9歳）の腹部単純CT画像である。

撮影された画像に対してFBP・ASiR 50%・ASiR 100%およびVeOを適応し、視覚評価を行い従来のFBPと比較した。またこれらの症例画像を使用するに当たり、当院の倫理委員会で承認を得た。

撮影条件は管電圧:120kV, 回転速度:0.6s/rot., 再構成スライス厚:2.5mm, ピッチファクター:0.984, ビーム幅:40mm, スキャン方式:ヘリカルスキャン, 収集検出器:0.625×64列, SFOV:Large FOV, マトリックス数:512×512, 再構成関数:standardである。なお,CT-auto exposure control (CT-AEC)の設定は,スライス厚2.5mmのSDが13.5HUになるように設定した。

画像表示方法はFBP・ASiR 50%・ASiR 100%およびVeOの画像を1枚ずつ表示し、連続確信度法で評価を行った。評価基準は、解像特性で分解能が高いFBPをボケていない画像とし、分解能が低いASiR 100%を最もボケている画像として、肝実質と肝腫瘍辺縁の明瞭さに着目した。これらの基準を基に視覚評価者に画像評価の教育を行った。教育後、FBP・ASiR 50%・ASiR 100%およびVeOの画像を自由尺度で5段階評価した。1を肝実質と肝腫瘍辺縁が最もボケているとし、5をボケていないとした。得られた結果はウィルコクソン法を用いて各ペアにおける有意差検定を行った<sup>8)</sup>。検定は両側検定を行い、有意水準は5%とした。観察者は放射線科医師2人と日常的にCT業務を行っている診療放射線技師5人で、経験年数は3~20年である。

## 2. 結果

### 2-1. 解像特性

Fig.2に、Task-based MTFを用いたFBP・ASiR 50%・ASiR 100%およびVeOによるMTFの測定値を示す。ASiRは強度が上がることでFBPと比較

してMTFが顕著に低下した。またVeOのMTFはFBPより低く、ASiR 50%に近い値であった。50%MTFの評価はFBPでは0.59cycles/mm, ASiR 50%では0.45cycles/mm, ASiR 100%では0.32cycles/mmであり、最も差があったFBPとASiR 100%では45.7%低下していた。VeOの50%MTFは0.48cycles/mmでASiR 50%より6.6%高い値であったが、FBPと比較して18.6%低下していた。

10%MTFの評価はFBPでは0.90cycles/mm, ASiR 50%では0.85cycles/mm, ASiR 100%では0.65cycles/mmであり、最も差があったFBPとASiR 100%では27.7%低下していた。VeOの50%MTFは0.85cycles/mmでASiR 50%と同等の値であり、FBPと比較して5.0%低下していた。

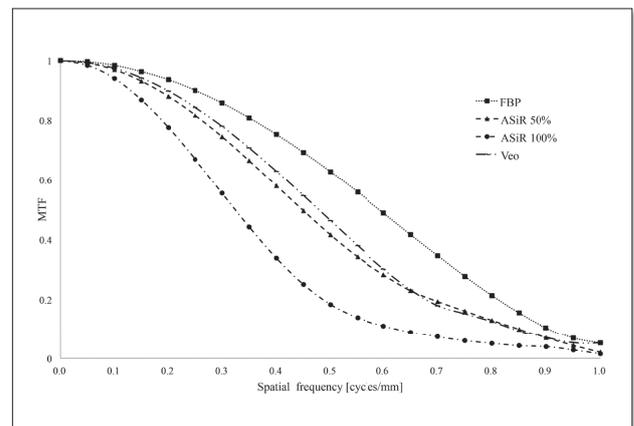


Fig.2 Modulation transfer function by the change of FBP・ASiR and Veo

### 2-2. ノイズ特性

Fig.3aに、対数表示の再構成方法別のNPSを示し、Fig.3bに、低空間周波数領域のグラフを示す。ASiRは強度を上げることによって、FBPと比較して中~高空間周波数領域のNPSが低減した。VeOは低空間周波数領域ではFBPやASiRより高いNPSとなり、それ以降はFBP・ASiR 50%より低いNPSとなったが、高空間周波数領域ではFBP・ASiRより高いNPSとなった。以下、FBPと比較したNPSの増減率を示す。0.15cycles/mmではASiR 50%が9.4%, ASiR 100%が18.7%低減したが、VeOは65.8%増加していた。0.65cycles/mmではASiR 50%が70.1%, ASiR 100%が98.9%低減したが、VeOは57.5%増加していた。0.80cycles/mmではASiR 50%が73.1%, ASiR 100%が98.9%低減したが、VeOは240.8%増加していた。

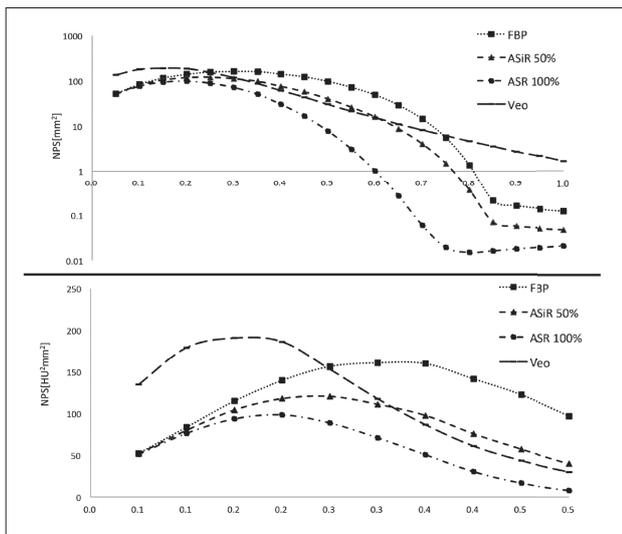


Fig.3 Noise power spectrum by the change of FBP・ASiR and Veo

(a) NPS at different reconstruction a  
 (b) NPS at the low frequency region b

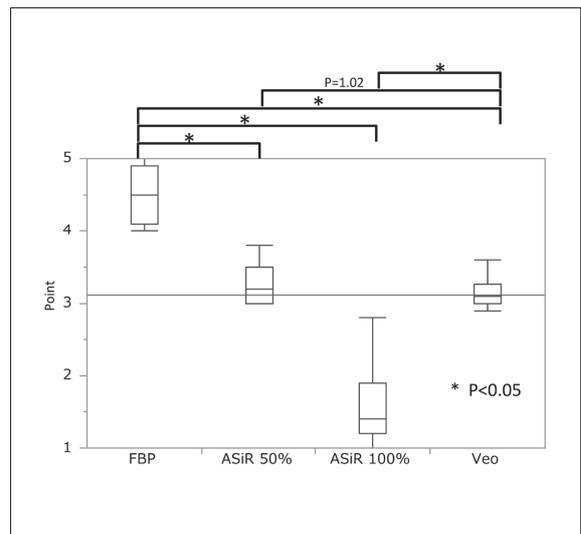


Fig.5 repeated measures ANOVA

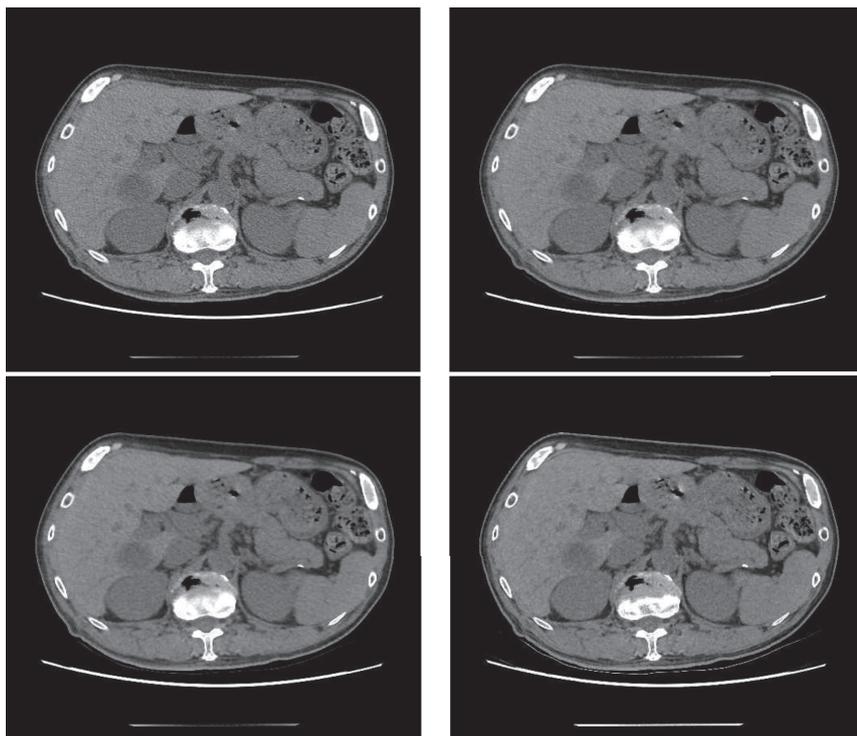


Fig.4 CT images reconstructed with FBP・ASiR 50%・ASiR 100%・Veo

(a) FBP (b) ASiR 50% (c) ASiR 100% (d) Veo

a	b
c	d

### 2-3. 視覚評価

FBP・ASiR 50%・ASiR 100%およびVeoで再構成した画像をFig.4に示し、視覚評価の結果をFig.5に示す。4条件の画像を比較した結果、FBPは4.5と最も肝実質と肝腫瘍の辺縁が明瞭な結果となり、以下、

ASiR 50%が3.2、Veoが3.1、ASiR 100%が1.2となり、ASiR 100%が肝実質と肝腫瘍辺縁でボケていると感じる画像となった。ASiR 50%とVeoに有意差は認められず同等の評価結果となった。

### 3. 考察

近年、IR法の物理評価方法が多様化する中、Veοによる物理特性を比較した報告が少ない現状であった。そこで本研究は、ASiRとVeοの解像特性とノイズ特性の測定を臨床と同様の撮影条件に設定することで、IR法の特徴を捉えることとした。さらに腹部単純CT画像における肝実質と肝腫瘍辺縁の明瞭さにおける視覚評価を行った。

ASiRの解像特性は、強度を上げるとMTFが顕著に低下した。それに伴いNPSでは、強度を上げると中～高空間周波数成分が大幅に低減した。これらのことは、高田ら<sup>2,9,10)</sup>がIR応用法について検討した研究の考察で述べているように、平滑化フィルターと同様の効果があったためと考える。平滑化フィルターは画像内の雑音成分である高空間周波数成分を除去または低減するために用いられる。しかし、高空間周波数成分は画像におけるエッジや輪郭の細かい情報も含まれているため、高空間周波数成分が低減すると解像力に差が生まれる。そのためASiRの解像力が低下したと考える。また今回のTask-based MTFが低下した理由として、ASiRがエッジを保持する能力が少ない特徴がある中で、エッジ成分の少ない低コントラストファントムを使用したことが挙げられる<sup>1,2)</sup>。ASiRにエッジを保持する能力が少ない原因として、IR応用法の原理とされている正規化項の影響が考えられる。正規化項の中には、クリニックポテンシャルと呼ばれる関数がある。クリニックポテンシャルには、画像全体を一様に平滑化する二次ポテンシャルとエッジを保存する性質があるエッジ保存型ポテンシャルがあり、これらの値が影響していると考えられる<sup>11)</sup>。

Veοの解像特性は、ASiR 50%に近いMTFであり、FBPと比較して解像力が低下していた。NPSは、0.31cycles/mmから0.60cycles/mmまでの中空間周波数領域ではASiR 50%よりも低い値であった。これは、臨床の撮影条件下において解像力はASiR 50%と同等であり、ノイズはASiR 50%よりも低減しており、高空間周波数成分が担保できていると考える。しかし、Veοの低空間周波数領域におけるNPSはFBP・ASiRより高い値であり、低コントラスト領域におけるノイズの改善がされていないと考える<sup>8,9)</sup>。VeοはFull IRとも呼ばれ、FBPを用いない画像再構成であり、IR応用法で使用した正規化項に加え、対数尤度を使用して計算しているとされている。対数尤度は、雑音の確率密度を考慮して再構成画像から計算される予

測投影データと実測投影データの距離を評価する項である。今回、Veοの低コントラスト領域におけるノイズが改善されていないことや解像特性がFBPより低いことは、対数尤度における予測投影データと実測投影データに差が生じていた可能性も考えられる。またIR応用法同様に、正規化項のクリニックポテンシャルの値が影響していたことも考えられる。

これらの結果を踏まえて、肝臓周囲の臨床画像で視覚評価を行った。結果はFig.5で示したようにFBP・Veο・ASiR 50%・ASiR 100%の順に評価が低くなり、ASiR 50%とVeοに有意差はなかった。視覚評価の高かったFBPは、他の条件と比較し5に近い値を示した。この結果は、肝実質と肝腫瘍の辺縁にボケを感じない画像であったと考える。一方で、視覚評価が低かったASiR 100%は1に近い値を示し、肝実質と肝腫瘍の辺縁が分かりづらく、従来言われているテクスチャーの変化によって観察者に違和感を与える結果になったと考える。またVeοとASiR 50%は有意差を認めない結果となった。これらの結果は物理特性と同様の傾向であり、今回のファントムや腹部単純CT画像のようにコントラスト差が約20HUと少ない領域におけるVeοの使用はASiR 50%と同等の結果を示した。

本研究の研究限界として、Task-based MTFを使用して検討を行ったが、視覚評価に用いた臨床画像のDFOVを統一することができていない点が挙げられる。今後は物理特性・視覚評価のDFOVも一致させ、より臨床に則した研究を行う必要があると考える。また視覚評価における基準を画像のボケのみではなく、コントラストの変化や肝腫瘍の検出の基準を設ける必要があると考える。今回の視覚評価の中には、Fig.6に示すようにVeοのコントラストが改善されている臨床例もあり、肝腫瘍の検出といった面では改善されており物理評価と視覚評価に隔たりがあったため、今後の検討課題である。

### 4. 結語

本研究では、ASiRとVeοの物理特性の比較評価と視覚評価を行った。ASiRの解像特性は最大45%低下し、ノイズ特性は最大92%低減した。Veοの解像特性は18%低下し、ノイズ特性は中空間周波数領域においては低減したが、低空間周波数領域では158%増加した。低コントラスト領域である腹部単純CT画像における、肝実質と肝腫瘍の辺縁の明瞭さにおける視覚評

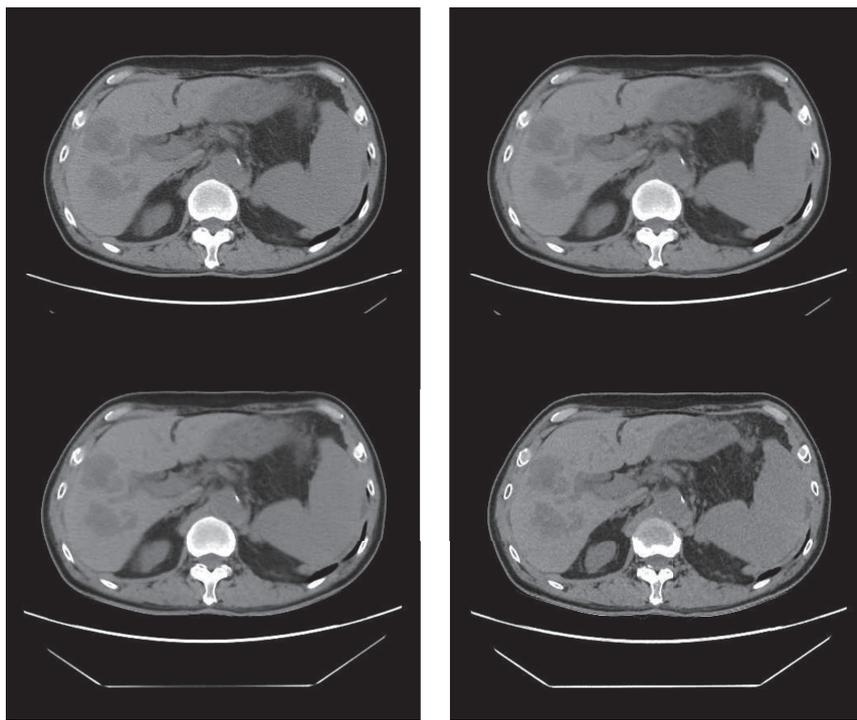


Fig.6 Image with low contrast improved by Veo

(a) FBP (b) ASiR 50% (c) ASiR 100% (d) Veo

a	b
c	d

価では、ASiR 50%とVeoは有意差が認められず同等の評価結果となった。

## 5. 謝辞

本稿を終えるに当たり、ご助言を頂いたGEヘルスケアジャパン 今井靖浩氏、駒沢大学大学院医療健康科学研究科診療放射線学専攻 吉川宏起氏、実験にご協力いただいた昭和大学江東豊洲病院 放射線室の諸兄に深謝致します。

なお、本研究の要旨は第42回日本放射線技術学会秋季学術大会（2014年10月、札幌）で発表した。

## 図の説明

- Fig.1 低コントラストファントム  
 Fig.2 FBP・ASiRおよびVeoのMTF  
 Fig.3 FBP・ASiRおよびVeoのNPS  
 (a) 全領域のNPS  
 (b) 低空間周波数領域のNPS  
 Fig.4 FBP・ASiR 50%・ASiR 100%およびVeoのCT画像  
 (a) FBP (b) ASiR 50%  
 (c) ASiR 100% (d) Veo  
 Fig.5 反復測定分散分析  
 Fig.6 Veoによって低コントラストが改善された画像  
 (a) FBP (b) ASiR 50%  
 (c) ASiR 100% (d) Veo

## 参考文献

- 1) 幸村吉博, 磯谷圭介, 宇戸朋之, 他: 逐次近似法を応用した画像再構成法による画像の特徴. 日放技学誌, 68(11), 1508-1518, 2012.
- 2) 高田忠徳, 市川勝弘, 林 弘之, 他: 逐次近似再構成法を応用した新しい画像再構成法に対する画質評価. 日放技学誌, 68(4), 404-412, 2012.
- 3) 山崎暁夫, 永澤直樹: CTにおける逐次近似再構成法の基礎的検討と臨床応用. 日放技学誌, 68(6), 767-774, 2012.
- 4) 西村一晃, 田中千香子, 深尾真理, 他: 逐次近似応用CT再構成を用いた低吸収域の検出能評価—超急性期脳梗塞評価用ファントムの開発および解析—. 日放技学誌, 72(2), 157-164, 2016.
- 5) 多田佳司, 内田幸司, 金山秀和: 急性期脳梗塞CT検査における逐次近似応用再構成法の有用性. 日放技学誌, 71(11), 1090-1095, 2015.
- 6) 市川勝弘, 原 孝則, 丹羽伸次, 他: CT画像におけるノイズパワースペクトル算出方法の比較評価. 医用画像情報学会雑誌, 25(2), 29-34, 2008.
- 7) 大村知己, 豊嶋英仁, 佐藤祐一郎, 他: 逐次近似応用再構成法を用いた頭部CT-Perfusionの撮影線量低減の検討. 日放技学誌, 69(11), 1218-1224, 2013.
- 8) 山崎信也: なるほど統計学とおどろきExcel統計処理 改訂第6版. 医学図書出版, 東京, 23, 2008.
- 9) 後藤光範, 佐藤和宏, 水口早苗, 他: CT画像の雑音測定における低周波数領域での精度向上. 東北大医保健学科紀要, 20(1), 55-61, 2011.
- 10) 森 一生: 近年のX線CT画像の非線形的特性と画質の物理評価について. 東北大医保健学科紀要, 22(1), 7-24, 2013.
- 11) 工藤博幸: 低被曝CTにおける画像再構成法—統計的画像再構成, 逐次近似画像再構成, 圧縮センシングの基礎—. MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 32(4), 239-248, 2014.