

臨床技術

補正組み込み型OS-EM法の再構成条件が
左室内腔容積算出に及ぼす影響中村祐也・富口静二¹⁾・勝田 昇²⁾・鷹本慶子³⁾論文受付
2008年11月29日論文受理
2009年3月25日

Code No. 523

熊本大学大学院保健学教育部

1) 熊本大学医学部保健学科

2) 熊本大学医学部附属病院医療技術部

3) 日立メディコアプリケーション部

緒言

近年の心筋血流SPECT検査では、投影データを心電図同期下で収集し、quantitative gated SPECT (以下QGS) 解析^{1)~3)}を行うことで左室内腔の拡張末期容積、収縮末期容積、心駆出率といった定量値の算出が可能である。しかし、QGS解析自体は本来filtered back projection (以下FBP)法を元に作成されたものであり、最尤推定期待値最大化(以下ML-EM)法やML-EM法を高速化させたordered subsets expectation maximization (以下OS-EM)法といった逐次近似法を

用いる場合には、iteration回数やsubset数、フィルタのcut-off値といった再構成条件の最適化がQGS解析による定量値を算出するうえで重要である。

画像再構成法にOS-EM法を使用する利点は、FBP法で問題となる高周波数領域からのストリークアーチファクトの発生、低カウント領域における信号雑音(S/N)比の低下といった影響を改善できることと、被写体内におけるγ線の減弱・散乱、コリメータ開口径による空間分解能の低下に対し各種補正項を逐次近似計算式に組み込み補正できることである。最近、

Effect of Reconstruction Parameters on a Calculation of Left Ventricular Volumes by OS-EM Reconstruction Algorithm Including Various Image Corrections

Yuuya Nakamura, Seiji Tomiguchi,¹⁾ Noboru Katsuda,²⁾ and Keiko Takamoto³⁾

Graduate school of Health sciences, Kumamoto University

1) Department of Health sciences, Kumamoto University

2) Division of Medical Technology, Kumamoto University Hospital

3) Applications Department, Hitachi Medical

Received November 29, 2008; Revision accepted March 25, 2009; Code No. 523

Summary

The aim of this study was to evaluate the effect of reconstruction parameters on the measurement of global left ventricular (LV) volume and define the appropriate reconstruction parameters when using the ordered subsets expectation maximization (OS-EM) method and 3D OS-EM (AstonishTM) method including the collimator distance response (CDR) recovery (RC) for myocardial perfusion SPECT study. Method: An anthropomorphic torso phantom with a 56 ml LV part was used. The LV volume was calculated with QPS software by the Update number (iteration number×subsets number) of OS-EM and 3D OS-EM (AstonishTM). Results and Conclusion: LV volumes calculated with OS-EM and AstonishTM without attenuation and scatter corrections corresponded to the true obtained by the Update number about 32 times and 24 times when using the OS-EM and AstonishTM method with attenuation and scatter corrections, respectively. However, LV volumes have changed greatly in the AstonishTM method according to the change in the Update number. Appropriate numbers of iterations and subsets are the measurement of global LV volumes, especially when using the OS-EM algorithm with RC.

Key words: ordered subsets expectation maximization (OS-EM), AstonishTM, attenuation correction, scatter correction, collimator distance response (CDR) recovery

別刷資料請求先：〒862-0976 熊本県熊本市九品寺4丁目24番1号
熊本大学大学院保健学教育部 中村祐也 宛

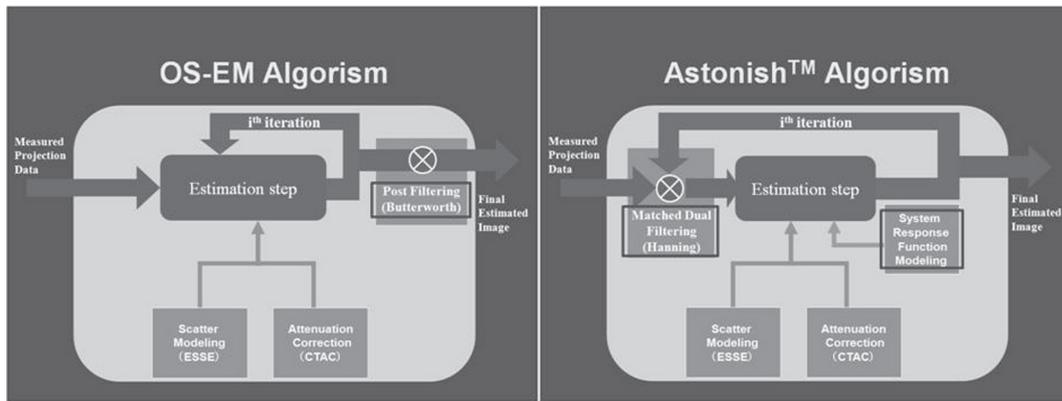


Fig. 1 Schematic display of OS-EM (a) and Astonish™ (b) reconstruction method.

a | b

三次元のコリメータ開口径補正を可能とした3D OS-EM法が開発され、臨床で使用できるようになった。

これまでにOS-EM法の再構成条件が左室内腔容積算出に及ぼす影響について報告^{4,5)}されているが、3D OS-EM法に関する報告は少なく、今回の研究では^{99m}Tcによる静態ファントムを用いた非同期時における実験を行い、OS-EM法およびコリメータ開口径補正が可能な3D OS-EM (Astonish™, Philips社製)法において再構成条件を変化させて画像再構成し、QGS解析に替わるquantitative perfusion SPECT (以下QPS)解析を用いることで、左室内腔容積算出への影響および最適条件を検討した。

1. Astonish法の概略

Astonish™ (AS)法にはプラナーおよびSPECT像にシステム分解能補正のみを行う機能もあるが、SPECT像の再構成にはさらなる高画質化のために、CT像を使用し、減弱および散乱線補正を適用することができる。この場合、SPECTおよびCT像が必要となり、SPECT/CT装置による撮像が基本となる。AS法(Fig. 1b)は、逐次近似法であるOS-EM法(Fig. 1a)が基本アルゴリズムである。コリメータの厚さ・開口径と線源の検出器からの距離および検出器の固有空間分解能に依存したシステム分解能の劣化⁶⁾は、ともにガウス関数で近似でき、これを検出確率に織り込むことで補正する。

フィルタ処理は、ハニング(Hanning)フィルタを更新近似ごとに用いることで、更新近似に伴うノイズ成分の増加を抑制する。これにより、OS-EM法で用いられる後処理フィルタリングと比較し、高分解能を保ちS/N比の高い画像再構成を可能としている⁷⁾。

また、CTデータより減弱補正係数マップ(以下 μ マップ)を作成し、減弱補正も可能である(X線CT減

弱補正法⁸⁾)。実際には、各ボクセルのCT値を γ 線の線減弱係数に変換し、これを投影データ中の各ボクセル内の検出確率に織り込むことで補正する。散乱線は、あらかじめ均一吸収体(水)中における散乱線の動向をエネルギーごとにモンテカルロシミュレーションし、実際に取得した被写体中の線源分布や μ マップとコンボリューションし投影データに含まれる散乱線成分を推定するeffective scatter source estimation (以下ESSE)法⁹⁾を用いて補正する。

AS法は、減弱、散乱線およびシステム分解能補正を行うことで画像のコントラストや均一性、空間分解能を向上させる。

2. 方法

実験には静態ファントムであるAnthropomorphic Torsoファントム(Data Spectrum社製)を使用し、心筋部：肝臓部：バックグラウンド比=1(0.15MBq/ml)：0.5(0.075MBq/ml)：0.05(0.0075MBq/ml)¹⁰⁾となるよう^{99m}Tc水溶液で調整した。ファントムの左室内腔容積の実測値は56mlで、心筋部には欠損を配置せず正常心筋を想定した。SPECTデータの収集は2検出器型SPECT装置SKYLight(Philips社製)を用いて行った。また、減弱補正、散乱線補正に必要な μ マップを作成するためにCT装置Lightspeed Ultra(GE社製)を用いてCTデータ(線減弱係数)を取得した。その他の使用機器および収集条件は、コリメータにはVXUR(低エネルギーSPECT超高分解能型)コリメータ、マトリクスサイズは64×64、ピクセルサイズは6.4mm、収集角度は180度(1検出器当たり90度)、収集方式はStep&Shoot、Step角度は2.813度、収集時間は60sec/step、検出器間角度は90度(L字型)、エネルギーウィンドウは141keV±10%、回転方式は自動近接撮影で行った。また、画像再構成はJet Stream Work Space(Philips社製)を用いてOS-EM法およびAS法で行った。フィルタ

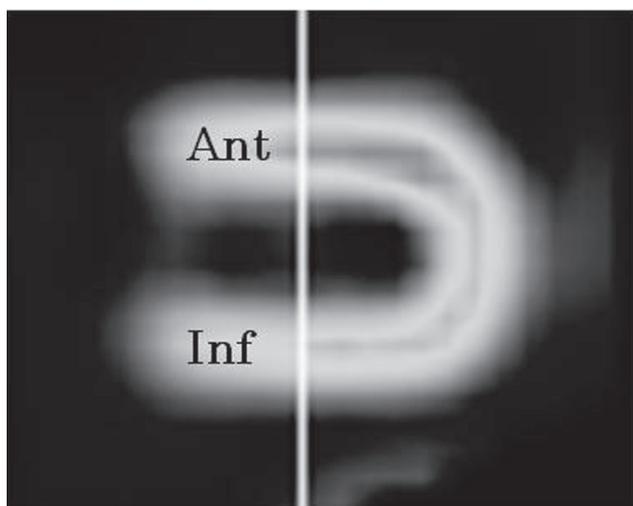


Fig. 2 Vertical line for making a profile curve on a VLA image.

処理は、OS-EM法ではButterworthフィルタ(cut-off値: 0.39cycles/cm, order: 8), AS法ではハニングフィルタ(cut-off値: 1.17cycles/cm)を用いた(各フィルタのcut-off値はメーカー推奨値)。再構成画像に対するプロファイルカーブの作成にはProminence Processor Ver.2.1(Prominence Conference)を使用した。

2-1 更新回数(iteration回数×subset数)の左室内腔容積算出への影響

更新回数(iteration回数×subset数)の変化が左室内腔容積算出に与える影響を調べるため、OS-EM法およびAS法について、iteration回数(1~20回)とsubset数(1, 2, 4, 8, 16, 32, 64)を変化させた計140通りの組み合わせを、画像補正なし(NC)、減弱補正を加えた場合(AC)、減弱補正・散乱線補正を加えた場合(ACSC)の計3パターンで画像再構成し、QPS解析により左室内腔容積を算出しファントム内心筋内腔の実測値(56ml)と比較した。なお、AS法ではすべての再構成画像にシステム分解能補正が施行される。

2-2 システム分解能補正の影響

QGS解析およびQPS解析では、再構成画像における心筋部のプロファイルカーブの立ち上がりをガウス関数で近似し、最大カウントの65%カウント部(peakの1SDに対する65%)を心筋内膜および外膜側として輪郭抽出が行われている¹⁻³⁾。システム分解能補正の輪郭抽出への影響は、心筋垂直長軸像(VLA像)に対しプロファイルカーブ(カウント値)を作成し(Fig. 2)、更新回数の変化によるプロファイルカーブの立ち上がりを比較し検討した。なお、本検討では減弱補正、散乱線補正は施行しなかった。

3. 結果

3-1 更新回数(iteration回数×subset数)の左室内腔容積算出への影響

Fig. 3は、減弱補正・散乱線補正なしの場合にiteration回数とsubset数を変化させたOS-EM法とAS法のQGS解析による左室内腔容積算出結果である。AS法では、システム分解能補正のみ施行されている。OS-EM法では更新回数約32回で真値を示し、それ以上更新回数を増加させても算出される左室内腔容積は変化しなかった。AS法でも更新回数約32回で真値を示し、以後更新回数の増加に伴い真値よりも大きく算出された。

更新回数8, 32, 128回におけるOS-EM法とAS法の再構成画像をFig. 4に示す。視覚的にも、AS法では更新回数の増加に伴う内腔輪郭の拡大が確認できる。

減弱補正を加えた場合(AC)と減弱補正・散乱線補正を加えた場合(ACSC)の左室内腔容積算出結果をFig. 5, Fig. 6に示す。

OS-EM法およびAS法のいずれの再構成法においても、左室内腔容積は更新回数24回程度で真値を示したが、減弱補正および散乱線補正を加えない場合と比較し、更新回数の増加に伴い左室内腔容積はより大きく算出された。

3-2 システム分解能補正の影響

iteration回数を変化させsubset数を固定した場合、iteration数を固定してsubset数を変化させた場合のOS-EM法、AS法のプロファイルカーブをFig. 7およびFig. 8にそれぞれ示す。

検討に使用したOS-EM法とAS法の再構成条件は、左室内腔容積が真値よりも小さく算出された更新回数(iteration回数×subset数)8回の場合、左室内腔容積が真値(56ml)を示した更新回数32回の場合、さらに、OS-EM法では左室内腔容積が真値で変化せず、AS法では真値よりも大きく算出された更新回数128回の場合である。

iteration回数を変化させsubset数を固定した場合、およびiteration数を固定してsubset数を変化させた場合のいずれにおいても、OS-EM法と比較しAS法では更新回数の増加に伴い、左室内膜側輪郭抽出点が外側に移動する傾向を認めた。

4. 考察

負荷心筋血流SPECTの有用性として、負荷時の肺野集積の増加、一過性内腔拡張(TID)、左室容積増加、右室集積増加および左室駆出率(EF)低下などが心筋虚血所見以外として挙げられる¹¹⁾。左室容積の変化については、左室収縮末期容積(ESV)の増大

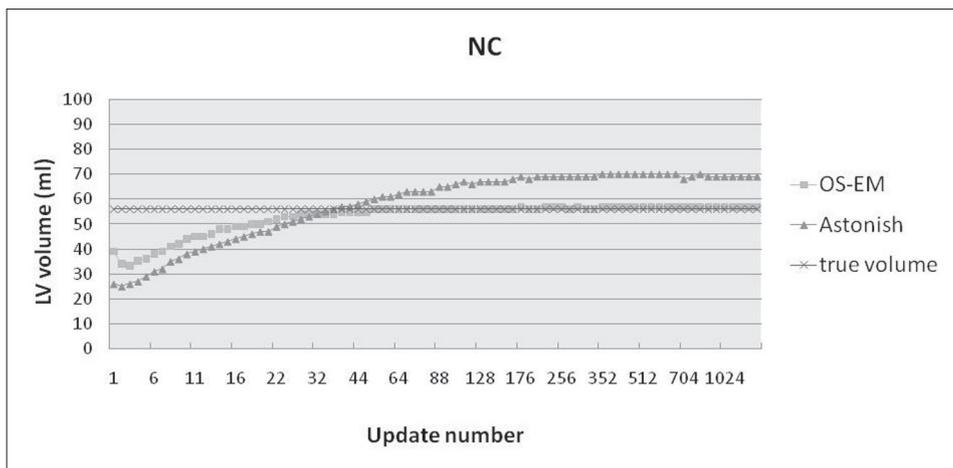


Fig. 3 Relationship between left ventricular (LV) volume and update number reconstructed by OS-EM and Astonish™ method.

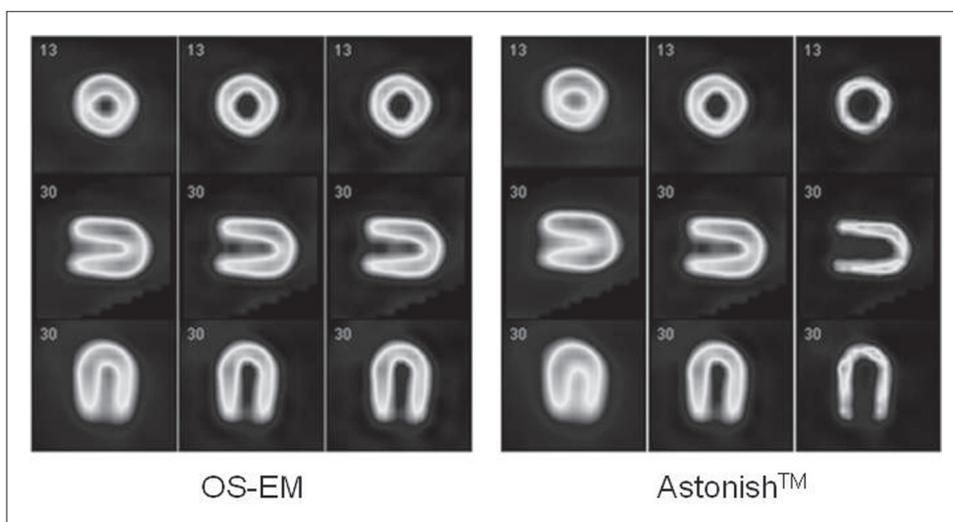


Fig. 4 Reconstructed images of OS-EM (left) and Astonish™ (right) method. OS-EM and Astonish™ methods are 8, 32, and 128 times of the Update number from the left.

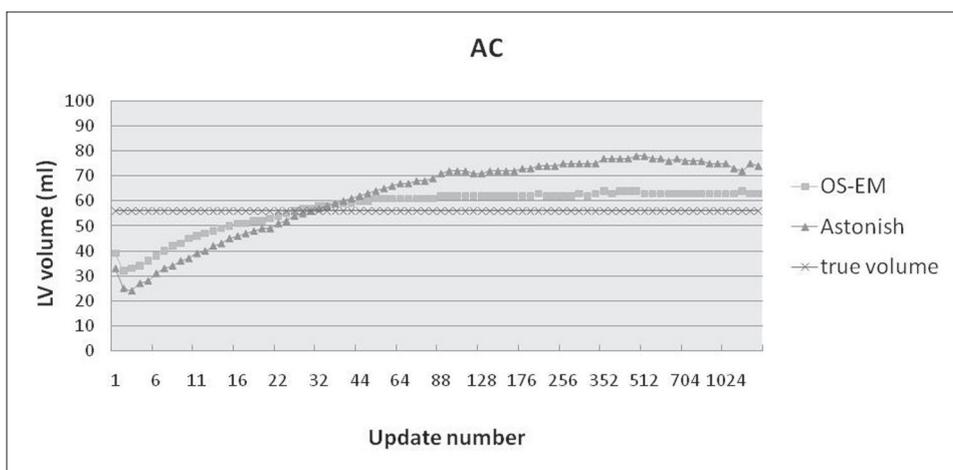


Fig. 5 Relationship between left ventricular (LV) volume and Update number reconstructed by OS-EM and Astonish™ method+AC.

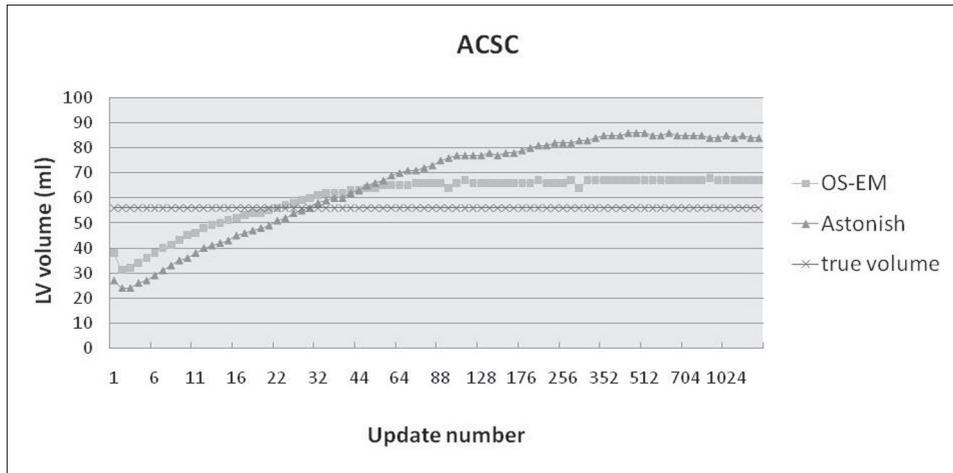


Fig. 6 Relationship between left ventricular (LV) volume and update number reconstructed by OS-EM and Astonish™ method+ACSC.

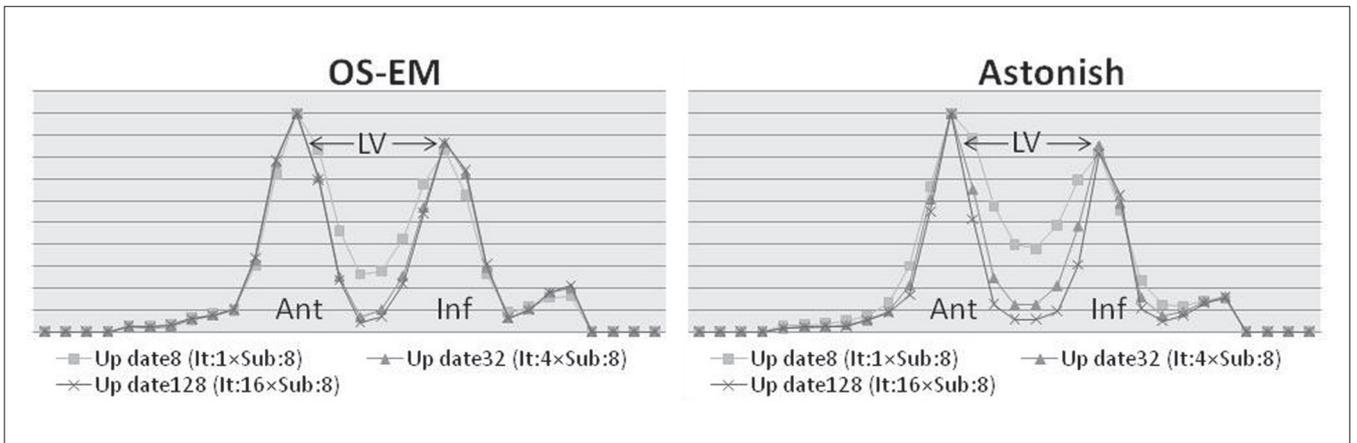


Fig. 7 Comparison of profile curves by changing the iteration number reconstructed by OS-EM and Astonish™ method.

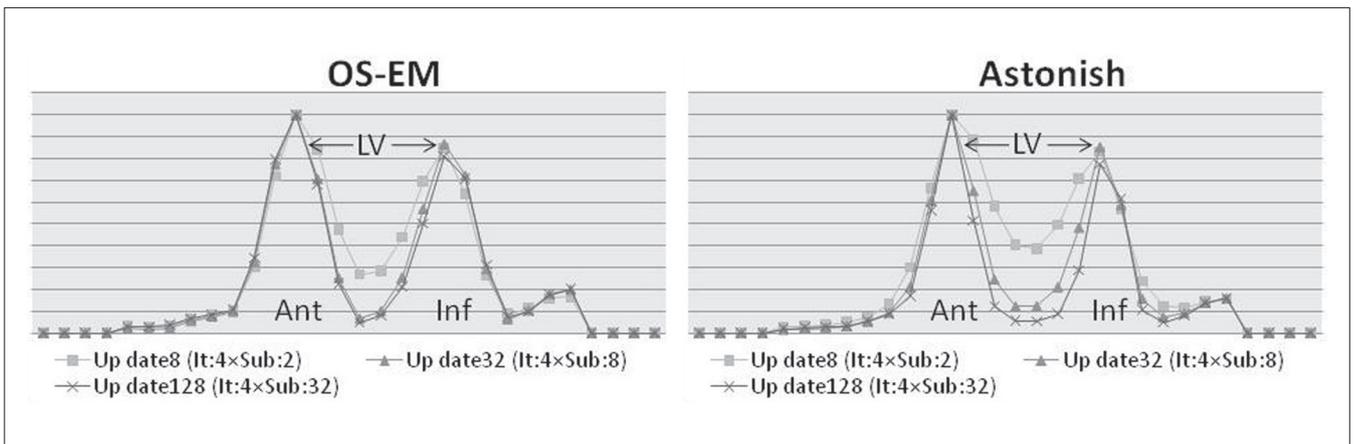


Fig. 8 Comparison of profile curves by changing the subset number reconstructed by OS-EM and Astonish™ method.

は、左室駆出分画(ejection fraction : EF)とは関連しない独立した予後因子と報告されている¹¹⁾。したがって、正確な左室内腔容積の算出は臨床的にも重要である。

減弱補正・散乱線補正を加えない場合には、OS-EM法およびAS法のどちらも更新回数約32回程度で左室内腔容積は真値を示した。OS-EM法の場合には更新回数を増加させても値は変化しなかったが、AS法では更新回数の増減に従い算出される左室内腔容積は変化した。プロフィールカーブの結果より、システム分解能補正を行うAS法と補正しないOS-EM法の比較は、OS-EM法では更新回数の増加によるカーブの立ち上がりには差は認められず、AS法では更新回数の増加に伴いカーブの立ち上がりは急峻となった。AS法で左室内腔輪郭線が外膜側に移動したのはこのことが原因で、更新回数の増加に伴い内腔容積は増加したと考えられる。またシステム分解能補正の影響は、iteration回数を固定してsubset数を変化させた場合およびiteration回数を変化させてsubset数を固定した場合のどちらにおいても同じ傾向で、iteration回数とsubset数を掛けた更新回数に依存していた。

減弱補正を加えた場合、あるいは減弱補正・散乱線補正を加えた場合にはOS-EM法、AS法ともに更新回数約24回と補正を加えない場合と比較し、より少ない更新回数で真値を算出した。これは、補正による均一性やコントラストの向上によると考えられる。しかし、システム分解能補正を行うAS法では、補正なしの場合と同様に、更新回数の増加に伴い左室内腔が大きく算出される傾向は同様であった。したがって、QPS解析における左室内腔輪郭抽出への更新回数の影響は、減弱・散乱線補正ではなくシステム分解能の有無によると考えられる。今回の検討より、補正を加えない場合には更新回数32回、補正を加えた場合は24回が最適と思われた。AS法で補正を加えた場合のメーカー推奨の更新回数は24回なので、臨床的にはメーカー推奨条件を使用しても左室容積算出に問題はないと思われる。

今回の検討では更新回数以外の再構成条件としてOS-EM法に対してはButterworthフィルタ、AS法に対

してはハニングフィルタを使用し、そのcut-off値に関してはメーカー推奨値を使用した。しかし、フィルタのcut-off値を変化させてQGS解析を行うと、算出される左室内腔容積は変化する^{4,5)}。Cut-off値を小さく設定した場合には、低周波成分が強調された画像となり左室内腔容積は小さく算出される。Cut-off値を大きく設定した場合には、高周波成分は雑音成分が多くを占める結果となり、左室内腔容積算出に与える影響が少なくなり、容積はあまり変化しない。Cut-off値の設定についても、収集時の幾何学的条件等で画像の周波数特性が変化するためにその設定に注意する必要がある。

今回の検討は、静態ファントムを用いて十分なカウントを収集した際の左室内腔容積算出に関するもので、再構成条件の妥当性は、実際にQGS解析が施行され低カウントとなる同期データにそのまま応用できるかは問題であり、今後動態ファントムあるいは低収集カウントによる検討も必要と考えられる。しかし、左室内腔容積や駆出率の算出においてはFBP法とOS-EM法は差がなく、コリメータ開口径補正を加えた場合には、容積算出はより正確であると報告されている¹²⁾。したがって、本法も心電同期データを用いたQGS解析にも適応できると考えられる。ただし、分解能補正を含む場合には、容積算出に影響する点は同様なので至適更新回数については、今回の結果と異なる可能性はある。この点については、今後臨床データを用いた検証が必要である。

5. 結論

OS-EM法、Astonish™で再構成した場合、今回の実験[投影データ数64方向(60秒/1方向)、静態ファントムによる非同期収集]において補正を行わない場合には更新回数32回程度、減弱補正および減弱補正・散乱線補正を行った場合には更新回数24回程度で左室内腔容積は真値を算出した。CDR補正、減弱補正および散乱線補正を含んだOS-EM法で画像再構成する場合には更新回数の変化に伴い、左室内腔容積が大きく変化するため、至適再構成パラメータの設定が必要であると思われた。

参考文献

- 1) Germano G, Kavanagh PB, Su HT, et al. Automatic reorientation of three-dimensional, transaxial myocardial perfusion SPECT images. *J Nucl Med* 1995; 36(6): 1107-1114.
- 2) Germano G, Kiat H, Kavanagh PB, et al. Automatic quantification of ejection fraction from gated myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Med* 1995; 36(11): 2138-2147.
- 3) Germano G, Erel J, Lewin H, et al. Automatic quantitation of regional myocardial wall motion and thickening from gated technetium-99m sestamibi myocardial perfusion single-photon emission computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 1997; 30(5): 1360-1367.
- 4) 柳沢正道, 丸 繁勲. 心筋gated SPECTにおけるOSEM法の検討-再構成条件の最適化-. *日放技学誌* 2001; 57(10): 1240-1247.
- 5) 吉田宣博. ECG-gated SPECT (^{99m}Tc)の心機能評価-QGSの収集処理条件の検討-. *日放技学誌* 2000; 56(8): 1052-1057.
- 6) El Fakhri G, Buvat I, Benali H, et al. Relative impact of scatter, collimator response, attenuation, and finite spatial resolution corrections in cardiac SPECT. *J Nucl Med* 2000; 41(8): 1400-1408.
- 7) Ye J, Song X, Zhao Z, et al. Iterative SPECT reconstruction using matched filtering for improved image quality. *IEEE Nucl Sci Symp* 2006; 4: 2285-2287.
- 8) Blankespoor SC, Xu X, Kaiki K, et al. Attenuation correction of SPECT using X-ray CT on an emission-transmission CT system: myocardial perfusion assessment. *IEEE Trans Nucl Sci* 1996; 43(4): 2263-2274.
- 9) Frey EC, Tsui BMW. A new method for modeling the spatially-variant, object-dependent scatter response function in SPECT. *IEEE Nucl Sci Symp* 1996; 2: 1082-1086.
- 10) Xiao J, de Wit TC, Staelens SG, et al. Evaluation of 3D Monte Carlo-based scatter correction for ^{99m}Tc cardiac perfusion SPECT. *J Nucl Med* 2006; 47(10): 1662-1669.
- 11) Higgins JP, Higgins JA, Williams G. Stress-induced abnormalities in myocardial perfusion imaging that are not related to perfusion but are of diagnostic and prognostic importance. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2007; 34(4): 584-595.
- 12) Daou D, Pointurier I, Coaguila C, et al. Performance of OSEM and depth-dependent resolution recovery algorithms for the evaluation of global left ventricular function in 201Tl gated myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Med* 2003; 44(2): 155-162.

図表の説明

- Fig. 1 OS-EM法およびAstonishTM法の概略図
 Fig. 2 Profile curveの検討に使用した心筋垂直長軸像
 Fig. 3 OS-EM法とAstonishTM法の更新回数と左室内腔容積との関係(補正なし)
 Fig. 4 OS-EM法とAstonishTM法の再構成画像(補正なし)
 Fig. 5 OS-EM法とAstonishTM法の更新回数と左室内腔容積との関係(+減弱補正)
 Fig. 6 OS-EM法とAstonishTM法の更新回数と左室内腔容積との関係(+減弱・散乱線補正)
 Fig. 7 Iteration回数を変化させ, subset数を固定したOS-EM法, AstonishTM法のprofile curve
 Fig. 8 Iteration数を固定し, subset数を変化させたOS-EM法, AstonishTM法のprofile curve