

—原 著—

骨 SPECT イメージングにおける補正組み込み 逐次近似画像再構成法を用いた 180度収集の有用性

松友 紀和^{1,2)} 深見 光葉¹⁾ 山本 智朗^{1,2)}

1) 杏林大学保健学部診療放射線技術学科

2) 杏林大学大学院保健学研究科診療放射線分野

Feasibility of Posterior 180° Acquisition of Bone SPECT Imaging with Attenuation Correction, Scatter Correction and Resolution Recovery

Norikazu MATSUTOMO^{1,2)}, Mitsuha FUKAMI¹⁾ and Tomoaki YAMAMOTO^{1,2)}

1) Department of Medical Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Kyorin University

2) Graduate School of Health Sciences, Department of Medical Radiological Technology, Faculty of Health Sciences,
Kyorin University

(article received : Jan 11, 2024)

Summary

【Objective】

This study aimed to demonstrate the feasibility and usefulness of 180° acquisition of bone SPECT/CT imaging using iterative reconstruction with several corrections to shorten the acquisition time.

【Methods】

We used a dual-head SPECT/CT camera equipped with a low-energy high-resolution collimator and a thoracic spine phantom (SIM2 bone phantom). All SPECT imaging was performed using 360° and 180° acquisitions with circular and non-circular orbits. The phantom image was reconstructed using the ordered-subset expectation-maximization algorithm with CT-based attenuation correction, scatter correction, and resolution recovery. Percent coefficient of variation (%CV) of the background section, percent contrast, and percentage of detectability equivalence volume (%DEV) of the tumor sections were evaluated using the automatic quantification package “Hone Graph” for bone SPECT.

【Results】

%CV was higher for 180° acquisition compared with 360° acquisition regardless of automatic contouring. However, there was no significant difference in percent contrast between 180° and 360° acquisitions. %DEV for small spheres (ø22 mm, ø28 mm) was superior with 180° acquisition (91.5%, 95.4%) compared with 360° acquisition (60.5%, 86.6%).

【Conclusion】

Although 180° acquisition showed inferior uniformity, it was shown to be applicable to bone SPECT/CT from the perspective of detectability of small lesions, demonstrating its usefulness for shortening acquisition time.

Key words: Iterative reconstruction, 180° acquisition, 360° acquisition, Bone SPECT, Bone phantom

1. 緒言 (はじめに)

Single photon emission computed tomography (SPECT) は放射性医薬品の分布を三次元的に捉えることができるため、骨シンチグラフィにおいてもその有用性が報告されている¹⁻³⁾。しかし、骨 SPECT はあくまでも全身撮像に対する追加撮像であり、検査時間の延長を招く。また収集時間が10分から15分程度^{4,5)}と SPECT 検査の中では比較的短いものの、背部痛が強く安静の保てない患者にとっては負担となる。そのため、収集時間の短縮は患者の心理的・肉体的な負荷軽減のために取り組むべき課題であると言える。

骨 SPECT の収集時間短縮について、これまでさまざまなアプローチから報告が行われている。Ichikawa らは、computed tomography (CT) 画像をセグメンテーションに利用した画像再構成法を用いることで、定量性を保ちながら収集時間を 1/3 程度にまで短縮できると報告している⁶⁾。また Gregoire らは、検出器に cadmium-zinc-telluride を用いた SPECT 装置を用いることで収集時間を大幅に短縮できたと報告している⁷⁾。しかし、これらの報告はハードウェアやソフトウェアへの依存性が高く、汎用性という観点からは限界があると言わざるを得ない。

一方、古くから心筋血流 SPECT で用いられている180度収集は、ステップ角度と1viewあたりの収集時間が同じ場合、360度収集と比較して特殊なハードウェアやソフトウェアを用いることなく収集時間が半分になるため、その汎用性と有用性は高い。この180度収集は、心臓が体の左前に位置していることから心筋血流 SPECT で可能な撮像方法であるが、近年、副甲状腺やセンチネルリンパ節など病変(対象物)が片側性に存在している場合でも適応可能であることが報告されている^{8,9)}。そこで、骨 SPECT にも180度収集が適応可能ではないかと考えられた。骨転移は、血流の豊富な造血髄が多い骨に好発し、胸椎や腰椎などに多く発生するため¹⁰⁾、限定的ではあるものの片側性病変と捉えることができる。また疼痛は、骨転移の主要な症状であり、がん疼痛のなかでも最も頻度が高いとされており¹¹⁾、患者の日常生活動作(activities of daily living)と生活の質(quality

of life)を考慮すると、病変検出能を損なうことなく、骨 SPECT の収集時間を短縮できることが望ましい。

そこで我々は、椎体病変を対象とした骨 SPECT における180度収集の有用性を明らかにすることを目的に、骨 SPECT 画像評価用ファントムとソフトウェアを用いて画質と病変検出能を検証した。

2. 方 法

2-1. 使用機器

SPECT/CT 装置は、低エネルギー高分解能型コリメータを装着した Infinia8 Hawkeye4 (GE Healthcare) で、ファントムには市川¹²⁾により開発された骨シンチ評価用ファントム SIM² bone Phantom (京都化学)を使用した(**Fig. 1**)。SIM² bone Phantom は体幹と横突起・棘突起部、椎体部、模擬腫瘍($\phi 13$, $\phi 17$, $\phi 22$, $\phi 28$ mm)から構成されており、骨 SPECT 画像の標準化や収集処理条件の最適化などさまざまな評価に用いられている^{13,14)}。解析ソフトは、Bone SPECT conference の自動骨 SPECT 画像解析ソフト Hone graph¹⁵⁾を使用した。

2-2. ファントム作成

SIM² bone Phantom の体幹部(バックグラウンド部: BG 部)と椎体部・横突起・棘突起部、腫瘍部に放射能濃度比が1:6.25:37.5となるように、^{99m}Tc 水溶液を 8 kBq/mL, 50 kBq/mL, 300 kBq/mL 封入した¹²⁾。なお、本研究では椎体部・横突起・棘突起部、腫瘍部に骨等価溶液は封入していない。

2-3. SPECT/CT 撮像と画像再構成

作成したファントムに対して、自動近接あり・なしで180度収集および360度収集をそれぞれ1回行った^{13,15-17)}。360度収集は検出器を対向配置に、180度収集はL字配置とし、180度収集の範囲は、椎体部をカバーできるように右側90度から左側90度までとした(**Fig. 2**)。収集モードはステップ回転収集で、ピクセルサイズ 4.42 mm, マトリクス数128×128(拡大率1.0倍)、収集エネルギーウインドウ 140 keV $\pm$ 10%, サブウインドウ 120 keV $\pm$ 5%, ステップ角度 6 度, 1 view あたり 20 秒, SPECT 回転半径(自動近接なし) 25 cm, 総収集時間が360度収集で10分, 180度収集で

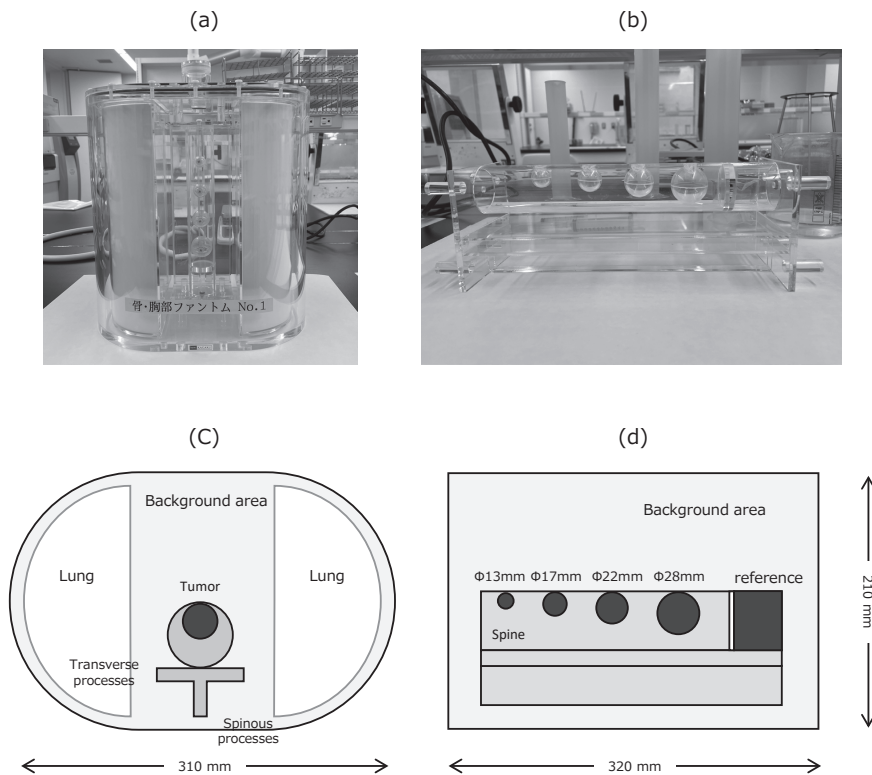


Fig. 1 Photographs and schema of the SIM2 bone phantom. (a) Overview, (b) spine part comprising vertebra, tumors, and transverse and spinous processes, (c) axial diagram and (d) sagittal diagram.

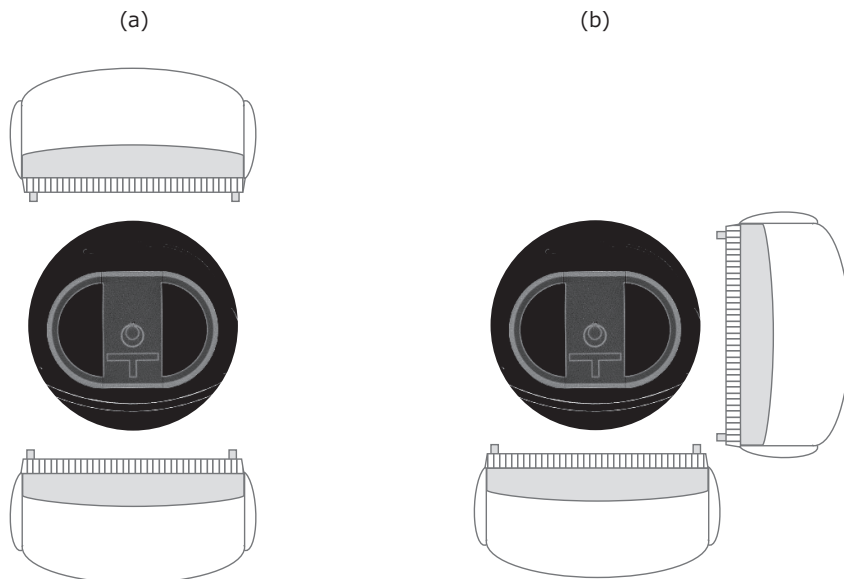


Fig. 2 Schematic of the acquisition method. (a) Conventional 360° acquisition using a dual-head SPECT system and (b) 180° acquisition from the posterior direction.

5分とした。画像再構成法は、サブセット10、イタレーション回数5の補正組み込み ordered subset expectation maximization 法で、散乱線補正 (scatter correction : SC) は逐次近似画像再構成組み込み dual energy window subtraction 法、減弱補正 (attenuation correction : AC) に CT 減弱補正を使用した。コリメータ開口補正 (resolution recovery : RR) は Evolution for BoneTM で、ノイズ除去フィルタ (後処理) に遮断周波数 0.40 cycles/cm, パワーファクタ10のバターワースフィルタを使用した。CT撮影条件は、管電圧 140 kV, 管電流 2.5 mA, スライス厚 5.0 mm, ヘリカルピッチ 1.9とした。

2-4. 画質評価

2-4-1. %CV と %Contrast

180度収集と360度収集で得られた SPECT 画像の画質は、Hone graph の自動解析から得られる BG 部の均一性 (percent coefficient of variation : %CV) と腫瘍部の%コントラスト (%Contrast) から評価した。各評価指標の算出式を以下に示す。

$$\%CV = \frac{SD_{BG}}{Mean_{BG}} \times 100\%$$

$$\%Contrast = \frac{\frac{Count_{sphere}}{Count_{bone}} - 1}{\frac{A_{sphere}}{A_{bone}} - 1} \times 100\%$$

ここで、 SD_{BG} と $Mean_{BG}$ は BG 部の標準偏差と平均 SPECT カウントで、 $Count_{sphere}$ は腫瘍部の平均 SPECT カウント、 $Count_{bone}$ は椎体部の平均 SPECT カウントを表す。 A_{sphere} と A_{bone} は腫瘍部と椎体部の封入放射エネルギーで、濃度比は 6 : 1 となる。

2-4-2. %DEV

%CV と %Contrast に加えて、腫瘍部の検出能 (percentage of detectability equivalence volume : %DEV) を以下の式から算出して評価した。

$$\%DEV = \frac{binarization\ Pixel_{sphere}}{Pixel_{sphere}}$$

%DEV は二値化処理 (最大 SPECT カウントの 45% 閾値) を利用した腫瘍部の描出能を表しており、 $binarization\ Pixel_{sphere}$ は二値化後に腫瘍部 volume of interest (VOI) 内に残ったピクセル数で、

$Pixel_{sphere}$ は腫瘍部 VOI 内の全ピクセル数である。この %DEV は模擬病変の視認性とよく一致することが報告されている¹⁵⁾。

Hone graph では、statistical parametric mapping を用いて、入力 SPECT 画像と SIM² bone Phantom の CT 画像から作成されたリファレンス画像のレジストレーションが行われ、テンプレート化された VOI が自動的に配置される。

3. 結 果

3-1. %CV と %Contrast

BG 部の %CV を Fig. 3 に示す。%CV は自動近接の有無によらず 360度収集よりも 180度収集で高値を示し、360度収集では 20.9% (自動近接なし)、20.7% (自動近接あり)、180度収集では 31.8% (自動近接なし)、31.5% (自動近接あり) となった。一方、%Contrast は球体サイズにより傾向が異なるものの、180度収集と360度収集で同程度となった (Fig. 4)。φ22 mm の %Contrast は、360度収集で 47.1% (自動近接なし)、50.4% (自動近接あり)、180度収集で 49.6% (自動近接なし)、56.2% (自動近接あり) であった。

3-2. %DEV

%DEV の結果を Fig. 5 に示す。φ13 mm の %DEV は自動近接や収集方法によらず算出できなかった。また、自動近接なしの φ17 mm についても算出できなかった。しかし、φ17 mm から φ28 mm の %DEV は 180度収集が 360度収集よりも優れる結果となり、φ22 mm の %DEV は、360度収集で 61.5% (自動近接なし)、60.5% (自動近接あり)、180度収集で 79.0% (自動近接なし)、91.5% (自動近接あり)、φ28 mm の %DEV は、360度収集で 85.0% (自動近接なし)、86.6% (自動近接あり)、180度収集で 97.5% (自動近接なし)、95.4% (自動近接あり) となった。

Fig. 6 に SPECT 画像を示す。表示カラーはグレースケール (inverse) で、表示スケールは 0 ~ 100% とした。180度収集で得られた SPECT 画像は、やや視覚的なひずみや均一性の低下が観察されるものの、360度収集で得られた SPECT 画像と明らかな違いは認められなかった。特に模擬病変については、180度収集と360度収集ともに同程度の視認性が得られていた。

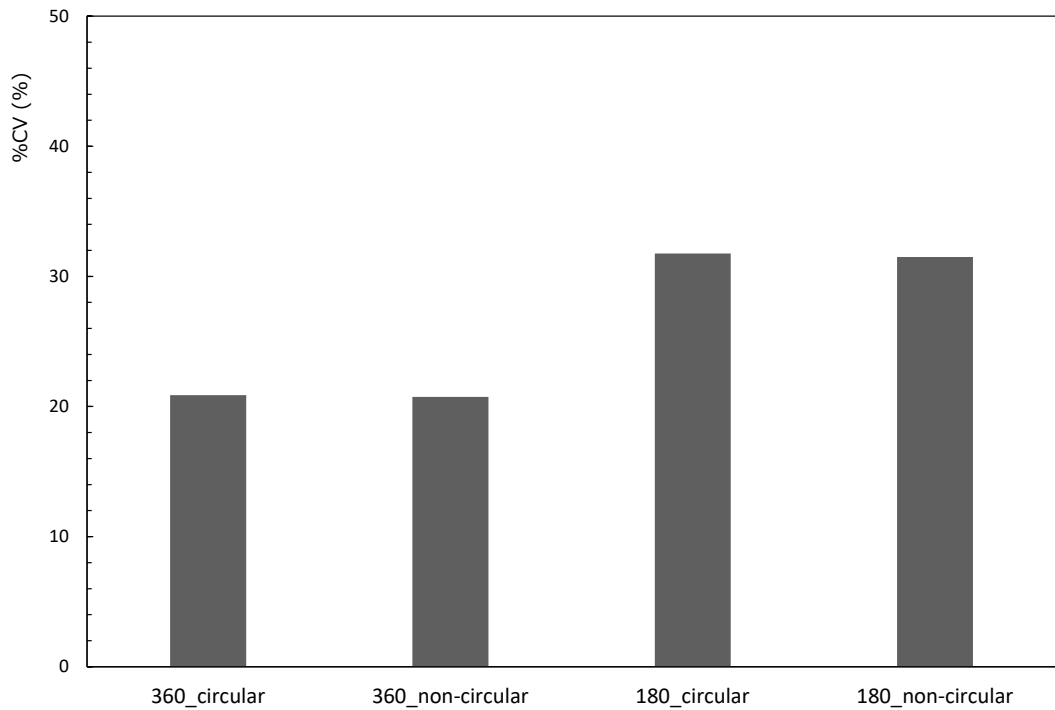


Fig. 3 Comparison of %CV in the background area for each acquisition methods. %CV was higher for 180° acquisition compared with 360° acquisition.

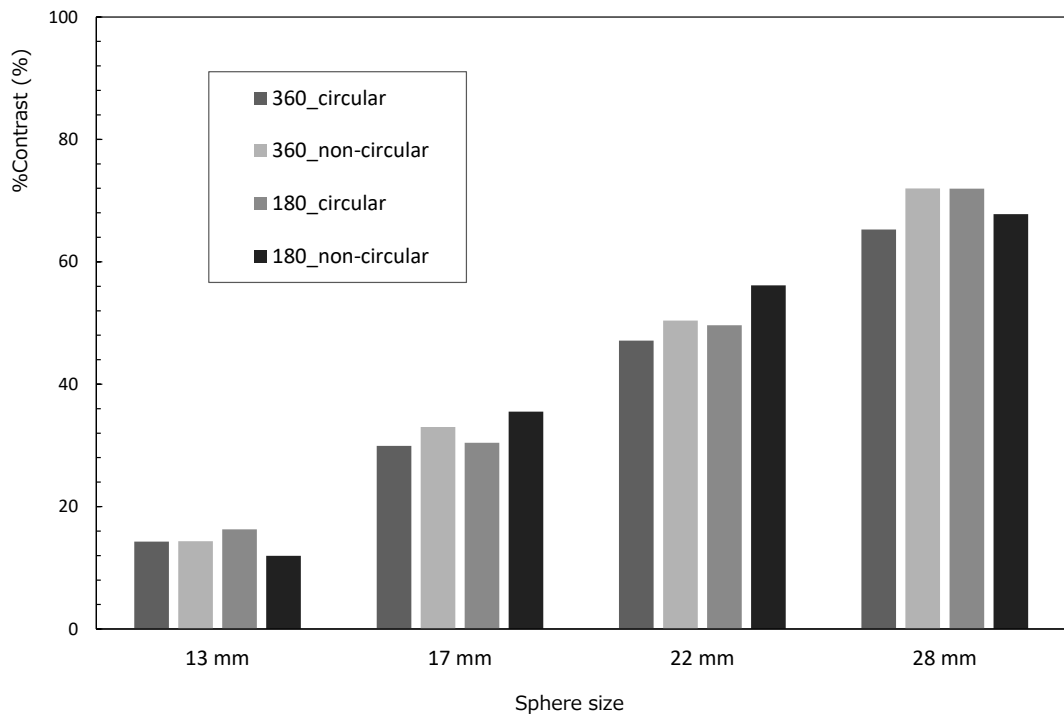


Fig. 4 Plots of %contrast. Although there were some variance, no significant difference in %contrast was observed between 360° acquisition and 180° acquisition.

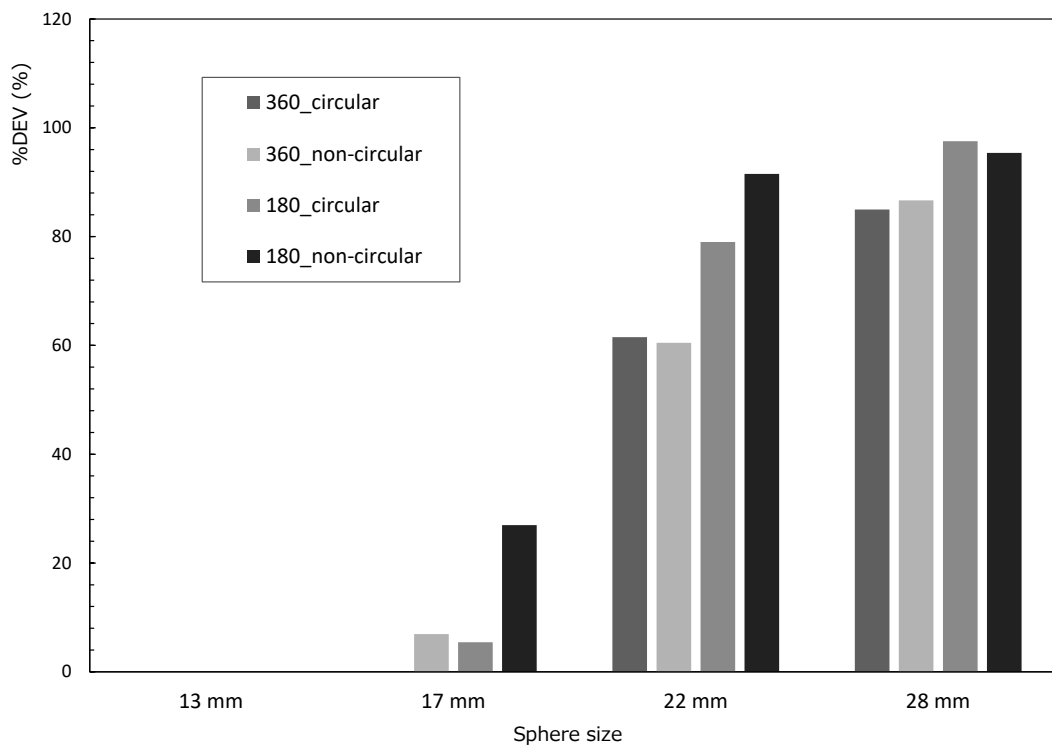


Fig. 5 %DEV by 360° acquisition and 180° acquisition for each sphere. %DEV was superior for 180° acquisition compared with 360° acquisition.

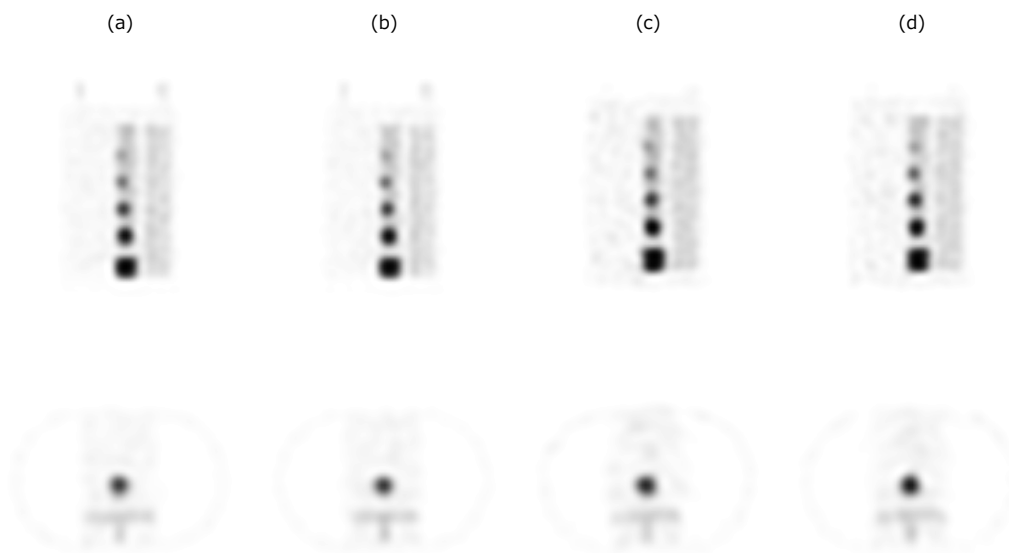


Fig. 6 Reconstructed images of the SIM2 phantom by 360° acquisition and 180° acquisition. The upper row shows sagittal images and the lower row shows transaxial images. (a) 360° acquisition circular orbit, (b) 360° acquisition non-circular orbit, (c) 180° acquisition circular orbit, and (d) 180° acquisition non-circular orbit.

4. 考 察

骨シンチ評価用ファントムと自動骨 SPECT 画像解析ソフトを用いて骨 SPECT に対する180度収集の有用性を評価した結果、180度収集と360度収集で得られた画像に明らかな違いはなく、180度収集は骨 SPECT に適応可能であると考えられた。

360度収集に比較して180度収集の %CV は、自動近接の有無によらず高値を示した。本研究では、1 view あたりの収集時間を360度収集と180度収集で同等としたため、180度収集の総収集時間は360度収集の半分となる。そのため、180度収集の収集カウントが低下し、均一性も低下したと考える。また、180度収集は不完全投影データとなるため、均一性の低下や独特のアーチファクトを生じる^{18, 19)}。しかし、骨 SPECT のように比較的、高コントラストなターゲットを対象とする場合には、均一性の低下はこの程度であれば許容できると考える。

すべての球体について、180度収集と360度収集の %Contrast は同程度であった。%Contrast はファントムに封入した放射能量との比から算出されるため、定量の正確性を示している。Ichikawa らは骨 SPECT の収集時間を短くしても、定量性に明らかな影響はなく、画像再構成アルゴリズムのみが大きく影響したと報告している⁶⁾。本研究では定量値(放射能量)を算出していないが、180度収集と360度収集の %Contrast が同程度であったことは、定量の面からも180度収集の妥当性を示しており、180度収集による収集時間の短縮が可能であると考ええる。

180度収集の %DEV は、360度収集よりも優れた結果となった。Zacho らは、360度収集で収集時間を短くした場合、診断の正確性は変化しなかったが、コントラストの低下がみられたと報告している²⁰⁾。一方で、Cheng らは^{99m}Tc-sestamibi による副甲状腺シンチグラフィについて、180度収集を用いることで病変コントラストが向上したと報告している⁸⁾。また、180度収集は、360度収集と比較して均一性に劣るものの、コントラストに優れていることが知られている²¹⁾。本研究においても180度収集を行うことで信号描出能の向上がみられており、収集時間の短縮とあわせて描出能を向上させることができる180度収集

の骨 SPECT に対する有用性は高いと考える。しかし、180度収集と360度収集ともに $\phi 13$ mm の %DEV は算出できなかった。本研究で使った SPECT/CT 装置の空間分解能 (full width at half maximum) は 8.1 mm (メーカー公称値) で、ピクセルサイズを考慮すると実効空間分解能は約 9.2 mm となる。そのため、サンプリング定理より $\phi 13$ mm は理論的に描出困難であり、SPECT 撮像の限界を示していると考ええる。

本研究では、椎体病変を模擬したファントムを使用したため、病変検出能の位置依存性については評価できていない。Schatka らは、180度収集を用いた場合、検出器から離れた位置にある球体のコントラスト低下やひずみが観察されると報告している²²⁾。したがって、画像のひずみに関しては今後の検討課題であるものの、180度収集はすべての症例に対して一律に使用できるものではなく、骨転移や疼痛部位が明らかな場合や安静が保てない場合など、状況に応じて使用すべきと考える。次に、本研究では様々な骨 SPECT 研究に用いられている専用のファントムとそれに対応したソフトウェアを使用した。単回のファントム実験であり、結果の再現性については慎重に判断する必要がある。最後に、本研究は造骨型の前立腺癌でみられる高集積病変に注目しており、溶骨型の骨転移でみられる集積低下や欠損病変 (Cold lesion) は評価していない。骨シンチグラフィでみられる Cold lesion は胸椎や腰椎に多く、頭蓋や胸骨などの扁平骨では少ないことが報告されている²³⁾。Peng らは、^{99m}Tc-Dimercaptosuccinic acid (DMSA) シンチグラフィについて、180度収集と360度収集の比較を行い、腎欠損の描出は同程度であったことを報告²⁴⁾しているが、骨 SPECT についても Cold lesion の描出能を含めた臨床データを用いた検証が必須である。

5. 結 論

180度収集は均一性に劣るものの、描出能の観点からは骨 SPECT に適応可能であり、椎体病変を対象とした骨 SPECT の撮像時間短縮に対する有用性が示された。

本研究に関して開示すべき利益相反はない。

引用文献 (references)

- 1) Römer W, Nömayr A, Uder M, et al. SPECT-guided CT for evaluating foci of increased bone metabolism classified as indeterminate on SPECT in cancer patients. *J Nucl Med* 2006; **47**(7): 1102-1106.
- 2) Utsunomiya D, Shiraishi S, Imuta M, et al. Added value of SPECT/CT fusion in assessing suspected bone metastasis: comparison with scintigraphy alone and nonfused scintigraphy and CT. *Radiology* 2006; **238**: 264-271.
- 3) Damle NA, Bal C, Bandopadhyaya GP, et al. The role of ^{18}F -fluoride PET-CT in the detection of bone metastases in patients with breast, lung and prostate carcinoma: a comparison with FDG PET/CT and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP bone scan. *Jpn J Radiol* 2013; **31**(4): 262-269.
- 4) Van den Wyngaert T, Strobel K, Kampen WU, et al. The EANM practice guidelines for bone scintigraphy. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2016; **43**(9): 1723-1738.
- 5) Bartel TB, Kuruva M, Gnanasegaran G, et al. SNMMI procedure standard for bone scintigraphy 4.0. *J Nucl Med Technol* 2018; **46**(4): 398-404.
- 6) Ichikawa H, Miyaji N, Onoguchi M, et al. Feasibility of ultra-high-speed acquisition in xSPECT bone algorithm: a phantom study with advanced bone SPECT-specific phantom. *Ann Nucl Med* 2022; **36**(2): 183-190.
- 7) Gregoire B, Pina-Jomir G, Bani-Sadr A, et al. Four-minute bone SPECT using large-field cadmium-zinc-telluride camera. *Clin Nucl Med* 2018; **43**(6): 389-395.
- 8) Cheng JL, Hsu CC, Wang PW, et al. The feasibility of anterior 180° $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sestamibi parathyroid SPECT/CT. *Ann Nucl Med* 2021; **35**(2): 203-210.
- 9) 薄井琉奈, 松友紀和, 深見光葉, 他. 乳がんセンチネルリンパ節 SPECT における180度収集の有用性—乳がん SLN 用評価ファントムを用いた検討—. *核医学技術* 2023; **43**(2): 113-119.
- 10) 高橋晃子. 骨転移による痛み. *がん看護* 2007; **12**(2): 222-226.
- 11) 向山雄人. 骨転移の治療とその痛みに対する効果: 化学療法. *がん看護* 1998; **3**(3): 177-181.
- 12) 市川 肇, 三輪建太, 松友紀和, 他. 骨等価溶液を用いた骨 SPECT 評価用ボディファントムの開発. *日放技学誌* 2015; **71**(12): 1235-1240.
- 13) Fukami M, Matsutomo N, Yamamoto T. Optimization of number of iterations as a reconstruction parameter in bone SPECT imaging using a novel thoracic spine phantom. *J Nucl Med Technol* 2021; **49**(2): 143-149.
- 14) Miyaji N, Miwa K, Tokiwa A, et al. Phantom and clinical evaluation of bone SPECT/CT image reconstruction with xSPECT algorithm. *EJNMMI Res* 2020; **10**(1): 71.
- 15) Ichikawa H, Kawakami K, Onoguchi M, et al. Automatic quantification package (Hone Graph) for phantom-based image quality assessment in bone SPECT: computerized automatic classification of detectability. *Ann Nucl Med* 2021; **35**(8): 937-946.
- 16) Matsutomo N, Fukami M, Yamamoto T. Impact of bone-equivalent solution density in a thoracic spine phantom on bone single-photon emission computed tomography image quality and quantification. *Radiol Phys Technol* 2023; **16**(2): 195-202.
- 17) Ichikawa H, Shibutani T, Matsutake Y, et al. Comparison of the detectability of hot lesions on bone SPECT using six state-of-the-art SPECT/CT systems: a multicenter phantom study to optimize reconstruction parameters. *Phys Eng Sci Med*. 2023; **46**(2): 839-849.
- 18) 飯塚一則, 山本範泰, 久木裕也, 他. SPECT 収集角度と収集軌道が画像に与える影響について—心筋デジタルファントムスタディー—. *日放技学誌* 2015; **71**(6): 520-526.
- 19) Burrell S, MacDonald A. Artifacts and Pitfalls in Myocardial Perfusion Imaging. *J Nucl Med Technol* 2006; **34**(4): 193-211.
- 20) Zacho HD, Manresa J AB, Aleksyniene R, et al. Three-minute SPECT/CT is sufficient for the assessment of bone metastasis as add-on to planar bone scintigraphy: prospective head-to-head comparison to 11-min SPECT/CT. *EJNMMI Res* 2017; **7**(1): 1.
- 21) Tamaki N, Mukai T, Ishii Y, et al. Comparative Study of Thallium Emission Myocardial Tomography with 180° and 360° Data Collection. *J Nucl Med* 1982; **23**(8): 661-666.
- 22) Schatka I, Bingel A, Schau F, et al. An optimized imaging protocol for $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Tc-DPD scintigraphy and SPECT/CT quantification in cardiac transthyretin (ATTR) amyloidosis. *J Nucl Cardiol* 2021; **28**(6): 2483-2496.
- 23) 佛坂博正, 藤村憲治. 骨シンチグラフィにおける“Cold” lesion の臨床的検討—特に転移性骨腫瘍について—. *核医学* 1980; **17**(8): 901-909.
- 24) Peng NJ, Liu RS, Chiou YH, et al. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -dimercaptosuccinic acid renal scintigraphy for detection of renal cortical defects in acute pyelonephritis: posterior 180° SPECT versus planar image and 360° SPECT. *Nucl Med Commun* 2001; **22**(4): 417-422.