

PET (positron emission tomography) 装置は、放射性同位元素によって標識された薬剤の生体内分布が画像化可能な分子イメージング装置です。これまでの PET 装置は、検出器が円筒形に隙間なく配置され、その円筒の中が撮影可能な範囲となっていました。それに対してわれわれの研究グループでは、円筒の一部を離して配置したとしても、その開放部の三次元画像が良好に得られることを示し、物理的に開放された視野をもつ世界初の開放型 PET 装置を OpenPET として提案しました¹⁾。OpenPET の開放空間をうまく使うことで、診断と治療の融合が可能となります。その中でも現在最も注目されているアプリケーションは、放射線治療との組み合わせです。放射線医学総合研究所には医療用加速器 (HIMAC: heavy ion medical accelerator in Chiba) があり²⁾、炭素イオンを光速の 80% まで加速して腫瘍に照射し癌細胞を破壊することで、切らずに癌を治す画期的な治療 (重粒子線治療) を行っています。重粒子線はエネルギーによってある一定の深さに線量分布が集中する性質をもっているため、正常な組織を避けつつ、腫瘍だけに線量を集中させることが可能です。そのため、治療中の腫瘍の位置を正確にとらえることが要求されます。また、重粒子の照射は綿密な計画とシミュレーションに基づいて行われますが、実際の照射時の線量を確認する手法はまだ確立されていません。照射中の腫瘍位置追跡、線量分布確認の両方に対して、OpenPET は大きな可能性を秘めています。線量分布確認の原理として、まず重粒子を生体に照射すると、生体を構成する元素が一部壊れて、陽電子放出核種となります。また、照射された粒子自身も核種に一部変わります。これらはまさに PET の薬剤として用いられている核種であるため、OpenPET によってそれらを治療中に計測することで、実際の線量分布をリアルタイムにモニターすることができると期待されています。さらに、照射するビーム自体を陽電子放出核種とすることで、より正確な線量分布を照射量が少ないうちから検出できるようになり、より効果的な治療が期待できます。

そして、今回紹介する OpenPET による腫瘍追跡は、現在提案されている中でも最もチャレンジング

なアプリケーションです (図 1)。通常の PET 検査では撮影に 20 分程度かけて収集したデータを反復的な画像再構成手法 (ML-EM: maximum likelihood expectation maximization, OS-EM: ordered subset expectation maximization 等) によって三次元画像化しますが、OpenPET による腫瘍追跡を実現するには、より高速な処理が要求されます。リアルタイムの線量分布確認のための PET 画像化については、照射から数十秒程度の遅れがあっても十分実用的であると考えられますが、腫瘍の位置を PET で確認しながら治療を行うためには、データ収集から画像化までの時間をほぼゼロに近づけなければなりません。画像再構成の高速化は長年取り組まれてきましたが、実際に PET を腫瘍追跡に用いた例はこれまでにありません。しかしながら、近年のハードウェアの進歩や画像再構成法の進歩、特に従来グラフィック演算に用いられてきた GPU (graphics processing unit) を汎用演算に用いる GPGPU (general-purpose computing on GPU) の登場と、PET で収集された生のデータであるリストモードデータから 1 回の反復で収束し、十分な画質を得ることが可能な 3D one-pass list-mode DRAMA (dynamic raw-action maximum likelihood algorithm³⁾、図 2)^{4,5)} の開発によって、リアルタイム再構成の実現が現実味を帯びてきました。われわれの研究グループでは 3D one-pass list-mode DRAMA を GPGPU の技術を用いて実装し⁶⁾、さらにデータ転送を工夫することで、定量

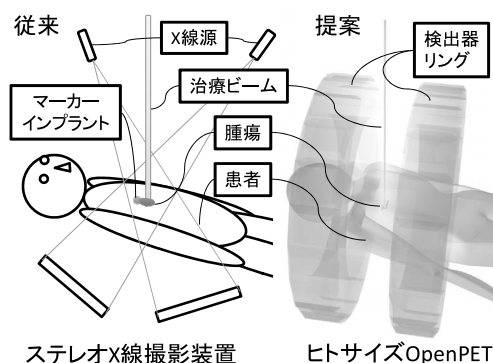


図1 放射線治療中の腫瘍追跡。従来技術では腫瘍近傍に埋め込まれたマーカーを撮影して間接的に腫瘍の位置をとらえている (左) が、OpenPET とリアルタイムイメージングにより、腫瘍の位置や大きさを直接見ながらの治療が可能になる (右)。

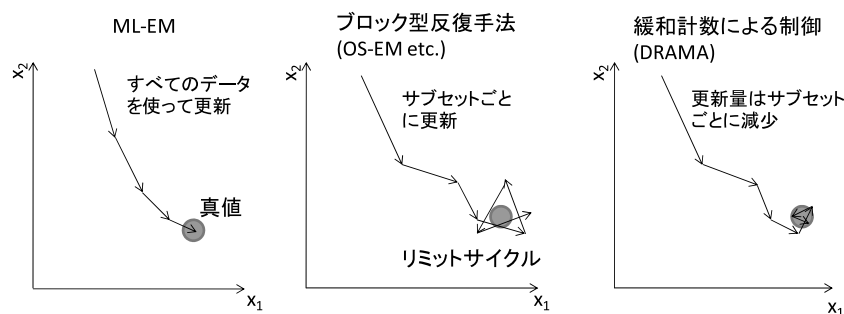


図2 反復的画像再構成手法の解更新の様子. 収束が遅い ML-EM に対し, データをサブセットに分割し, サブセットごとに解を更新することで収束が早まるが, サブセットによって異なるノイズ伝播の影響で正しく収束せずリミットサイクルに陥る. DRAMA では緩和計数を導入することで, サブセット間のノイズのばらつきを抑え, 正しい解に収束するように工夫されている.



図3 リアルタイムイメージングシステムのコンセプト実証実験. OpenPET の開放空間で点線源を上下動させ, データ収集, 画像再構成, 表示までをリアルタイムに行った. フレームレートは毎秒2フレームで, 同時に撮影した光学カメラの映像に追随していることを確認した.

性のある程度保ちつつフレームレートを安定化させる新しいシステムアーキテクチャを提案し⁷⁾, OpenPET 小型試作機⁸⁾において実装, 評価してきました. そして, 世界で初めて PET による動く線源の追跡がリアルタイムに行えることを実証しました (図3).

今後, ヒトサイズの実証機の開発を行い, ヒトサイズでの OpenPET リアルタイムイメージングを目

指して開発を進めていく予定です. 開放空間をもつ OpenPET のアイデアによって PET の可能性が大きく広がりましたが, それに加えてリアルタイムイメージングを実現することで, 新しい医療スタイルが生まれ, 国民生活の質の向上につながると期待しています. (放射線医学総合研究所 田島英朗)

文 献

- 1) T. Yamaya *et al.*: "A proposal of an open PET geometry," *Phys. Med. Biol.*, **53** (2008) 757-773.
- 2) Y. Hirao *et al.*: "Heavy ion synchrotron for medical use: HIMAC project at NIRS-Japan," *Nucl. Phys. A*, **538** (1992) 541-550.
- 3) E. Tanaka and H. Kudo: "Subset-dependent relaxation in block-iterative algorithms for image reconstruction in emission tomography," *Phys. Med. Biol.*, **48** (2003) 1405-1422.
- 4) T. Nakayama and H. Kudo: "Derivation and implementation of ordered-subsets algorithms for list-mode PET data," *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* (2005) pp. 1950-1954.
- 5) 工藤博幸ほか: "PET 装置開発研究の展望 (11) 究極の PET 画像再構成法 DRAMA—新しい緩和パラメータ制御法とワンパス DRAMA の提案—, 次世代 PET 研究報告書 (2009) pp. 76-82.
- 6) S. Kinouchi *et al.*: "GPU implementation of list-mode DRAMA for real-time OpenPET image reconstruction," *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* (2010) pp. 2273-2276.
- 7) H. Tashima *et al.*: "Real-time imaging system for a small OpenPET prototype," *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* (2010) pp. 3357-3360.
- 8) T. Yamaya *et al.*: "Development of a small prototype for a proof-of-concept of OpenPET imaging," *Phys. Med. Biol.*, **56** (2011) 1123-1137.