

## はじめに：三次元ゲル線量計特集にあたって

広島国際大学 林 慎一郎\*

Introduction of the special issue on three-dimensional gel dosimeters is described.

**Keywords:** gel dosimetry, radiation therapy, MRI, optical CT, introduction

近年、放射線治療の分野における装置や技術の飛躍的な発展により、正常な組織へのダメージを低減しつつ、腫瘍の形に合わせて線量を集中させて照射を行う強度変調放射線治療や粒子線治療などさまざまな高精度放射線治療が行われている。これらの治療では、従来よりも高い位置精度および線量精度が得られる反面、それに合わせた品質管理・品質保証 (QC・QA) もまた必要とされる。それらの精度検証に対してこれまでは電離箱線量計や半導体検出器、あるいはフィルムといった点や面の線量計が用いられてきたが、将来的には線量評価を直接三次元的に行うことが求められている。さらに、磁場を利用する MRI (Magnetic Resonance Imaging) と医療用加速器を組み合わせた装置 (MR-Linac) や超高線量率での照射 (FLASH) など、既存の線量計では測定が困難な技術も現れている。それらに対応した線量計候補のひとつとして三次元ゲル線量計 (ゲル線量計) が改めて注目を集めている<sup>1,2)</sup>。

三次元ゲル線量計とは、放射線感受性物質を含む水溶液をゼラチンなどのゲル化剤で固化 (ゲル化) した化学線量計の一群である。放射線により生じた生成物はゲルマトリクスによって保持され、その空間分布を MRI や X 線 CT (X-ray Computed Tomography, XCT)、光学 CT (Optical CT, OCT) などを用いて三次元的に直接読み取ることにより吸収線量分布を評価することができる。また、その変化は白濁や色調の変化となって現れるので、線量分布を目視でも確認でき、直感的

に理解しやすいのも利点である。さらに、その重量の 90% 前後が水であるため水等価、あるいは人体組織等価とみなせるので、線量計自体を水 (組織) 等価ファントムとして扱うことができるのも大きな特徴である。

代表的なゲル線量計としては、ビニルモノマーの放射線誘起ラジカル重合反応を利用したポリマーゲル線量計 (polymer gel dosimeter)<sup>3)</sup>、鉄イオンの酸化反応 ( $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ ) を利用したフリッケゲル線量計 (Fricke gel dosimeter)<sup>4)</sup>、放射線感受性物質の酸化還元に伴う発色や蛍光を利用したラジオクロミックゲル線量計 (radiochromic gel dosimeter)<sup>5)</sup> があげられる。

照射後の読み出しには、ポリマーゲルやフリッケゲル線量計については主に MRI が用いられるが、ラジオクロミックゲル線量計ではその吸光度や蛍光を読み取るために分光器や 2D スキャナ、OCT が用いられる。特に OCT は MRI に比べて小型かつ低コストで導入でき、短時間で高分解能の撮像が可能なることから近年注目されており、本特集記事においても多く報告されている。しかし、海外のメーカーからいくつかのゲル線量計専用の OCT<sup>6)</sup> が販売されているものの、その価格や性能・汎用性の点からまだ一般に普及しているとは言い難い。そのため国内外で、より安価でかつ高性能な OCT の開発が進められており、またそれと並行してラジオクロミックゲル線量計の開発も盛んになりつつある。加えて、ゲルではないが類似の線量計として、放射線感受性色素を硬化性樹脂 (ウレタン樹脂 (プラスチック) やシリコーンエラストマー (ゴム)) で固めたラジオクロミック線量計<sup>7,8)</sup> なども研究開発が行われている。

一方、実際のゲルマトリクス中の反応では放射線感受性物質の直接反応だけでなく、ゲル化剤や溶存酸素との反応、pH や温度などの環境による影響、各種添加剤との反応により、複雑な反応が生じている。それらの反応機構を理解することは、新規なゲル線量計の開発や改良にとって不可欠である。また、その組成や成分を比較的柔軟に調整することができるのでさまざまな特性を持たせることも可能である。実際のゲル線量計の開発や臨床応用に向けては以下のような項目が求

Introduction: For the special feature on 3D gel dosimetry Shin-ichiro HAYASHI\* (Hiroshima International University), 〒739-2695 広島県東広島市黒瀬学園台 555-36 TEL: 0823-70-4587, FAX: 0823-70-4931, E-mail: rin@hiroko-u.ac.jp

められる。

a) 組成 (Chemical)

新規放射線感受性物質や添加剤の探索, 組成の最適化, 作製コストの低減, 低毒性, 容器, 他.

b) 特性評価 (Physical)

線量感度, 分解能, 空間-時間-熱安定性, LET 依存性, 他.

c) 臨床応用/普及 (Clinical & Industrial)

読み出し精度の向上, 解析ソフトウェアの整備, 大型化, 供給システムの確立, 標準化 (プロトコルの確立), 読み取り装置 (OCT) の開発, 他.

d) 基礎理論 (Theoretical)

放射線化学反応機構の解明, 理論計算 (シミュレーション), 他.

今回の特集では, 昨年, 第 10 回を迎えた三次元 (3D) ゲル線量計研究会<sup>9)</sup> の発表から, 一部ではあるが, 国内で行われている最新の取り組みについて 7 名の研究者にご紹介いただいた。これからゲル線量計を始めみたい方や学生の皆さんにとってもチャレンジングなテーマはまだ多く残されており, 放射線化学的な知見が求められている。本特集を参考にさせていただいて, 興味を持たれたところ, 得意な分野から是非参入していただければ幸いである。

とはいえ, これらの課題について, 個人やひとつの施設, 研究グループが全て行うことは現実的ではない。放射線化学討論会ならびに三次元ゲル線量計研究会などでの議論や情報交換, さらに共同研究などを通じてひとつずつクリアされ, 臨床での実用化と普及につなげていきたいと考えている。

〈参考文献〉

- 1) e.g. Proceedings of International Conference on 3D Radiation Dosimetry, J. Phys.: Conf. Ser., 2167 (2022), 1305 (2019), 847 (2017), 573 (2015), 444 (2012), 250 (2010), 164 (2008).
- 2) 林 慎一郎, 放射線化学, 100 (2015) 83.
- 3) C. Baldock, Y. De Deene, S. Doran, G. Ibbott, A. Jirasek, M. Lepage, K. B. McAuley, M. Oldham, L. J. Schreiner, Phys. Med. Biol., 55 (2010) R1.
- 4) L. J. Schreiner, J. Phys.: Conf. Ser., 3 (2004) 9.
- 5) 笛吹 修治, 医学物理, 37 (2017) 95.
- 6) e.g. VISTA™(Modus Medical Devices Inc., USA) , <https://modusqa.com/products/vista-16-optical-ct-scanner-for-3d-dosimetry/>
- 7) J. Adamovics, K. Jordan, J. Dietrich, J. Phys.: Conf. Ser., 56 (2006) 172.
- 8) E. M. Høye, P. Balling, E. S. Yates, L. P. Muren, J. B. B. Petersen, P. S. Skyt, Phys. Med. Biol., 60 (2015) 5557.
- 9) 3D ゲル線量計研究会, <http://www.hirokoku-u.net/hr/dosgel/index-j.html>

〈著者略歴〉

林 慎一郎: 平成 3 年 広島大学大学院理学研究科化学専攻博士課程後期退学, 同年より広島大学理学部附属微晶研究施設助手, 同大学理学部物理学科助手, 平成 10 年より広島国際大学保健医療学部診療放射線学科専任講師, 助教授, 准教授を経て令和 3 年より現職 (同教授), 博士 (理学), 専門: 物理化学, 医療工学. 趣味: 読書, 温泉, 孤独のグルメ.