



Title	BaTiO ₃ 誘電体を用いた新たな線量測定システムの開発 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	久我, 悠馬
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医理工学)
Dissertation Number	甲第15033号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/86131
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuma_Kuga_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医理工学） 氏名 久我 悠馬

学位論文題名

BaTiO₃誘電体を用いた新たな線量測定システムの開発
(Development of a novel dose measurement system using BaTiO₃ dielectric)

【背景と目的】

放射線治療はがん治療法の一つであり、外科療法に比べて肉体的な負担が少なく、機能・携帯を保存しながら治療することが可能である。放射線治療の精度管理において、所定の場所に正しく線量が投与されていること・機械が指示通り動作していることの確認は大変重要である。そのため、臨床現場ではQA（Quality Assurance）を行うことで、放射線治療の品質を保っており、線量測定にはフィルムや2次元線量計（電離箱線量計、半導体線量計）が用いられるのが一般的である。しかし、2次元線量計では検出素子を大量に配置する必要があるが、上記の線量計は非常に高価なものとなっている。一方、本研究室では、チタン酸バリウム誘電体を用いたコンデンサの静電容量が放射線照射によって変化することを発見しており、様々な線量測定システムに応用できると考えられる。

近年、定位放射線治療などによる治療の高精度化に伴い、小照射野での線量分布測定において正確さや高い分解能が求められている。一般的に使用される2次元線量計は、検出素子のコストが高いことや素子サイズが大きいことから、空間分解能は高くはない。そのため、ガイドラインによって定められている許容誤差（3% 2mm）よりも高い分解能で線量分布チェックができていない。したがって、本当に正しく治療の品質保証ができていないと言えない。一方で、現段階で治療時の投与線量を測定するシステムは存在しておらず、本当に治療計画通りの線量が照射されたかは分からない。過去には誤照射事故が発生したケースも報告されており、治療時の体内線量を測定することが望ましい。先行研究では、小型の半導体線量計を利用した測定が行われているが、通信距離が短いことや、角度依存性によって測定誤差が大きいことが問題となっている。

コンデンサ線量計は安価で小型であり、さらに方向依存性がないことが確認されているため、上記の問題をできる可能性がある。そこで、本研究ではコンデンサ線量計（BaTiO₃誘電体）を利用した「安価で高分解能なアレイ型コンデンサ線量計の開発」と、「コンデンサ線量計を利用した体内線量測定システムの開発」について検討を行った。

【対象と方法】

アレイ型コンデンサ線量計は、放射線照射による静電容量変化から照射線量を求める必要がある。さらに、高分解能なアレイ型線量計を開発するには、短時間で複数のコンデンサの静電容量変化を測定できるシステムが必要となる。そこで、FPGAと呼ばれる並列処理に優れたICを利用し、LC発振回路の共振周波数変化から静電容量変化を求められるシステムを開発した。その後、既存の線量計との線量分布比較を行うことで、線量計の測定精度の妥当性について評価した。

一方で、体内埋め込み可能な線量計に関しては、線量計の周波数変化を遠隔から無線測定する必要がある。従来と同じような試みでは問題を解決できないと予想されたため、S11反射特性を利用した方法ではなく、S21伝送特性と磁界共振方式を組み合わせることで周波数を測定する方法を考

案した。実験は測定システムの妥当性を示すために、シミュレーションと実測を照らし合わせながら行い、比較的簡単な測定体系から複雑にしていくことで、臨床現場でも十分に実現可能であることを示した。

【結果】

アレイ型コンデンサ線量計では、自作の1次元プロファイル測定器と既存の2次元線量計 (IC Profiler) のラインプロファイルを比較したところ、よく一致することが確認された。また、自作1次元プロファイル測定器は、非常に安価でありながら、2次元線量計よりも分解能が高いことが確認された。2次元プロファイルの測定では、簡易なアレイ型コンデンサ線量計を作成し、照射実験を行ったところ、照射した範囲と静電容量変化を起こした範囲が非常によく一致することが確認された。

体内埋め込み可能な線量計は、磁界共振方式と S21 に生じる位相ずれを組み合わせた周波数測定により、先行研究よりも通信距離が長い場合でも測定可能であることが示された。さらに、シミュレーションと実測が非常によく一致することからも、測定原理が妥当であることが示された。また、磁界共振を利用した方法は生体のような誘電体から受ける影響が小さく、生体を模擬した水中においても 15 cm 以上で通信可能であり、コンデンサ線量計は方向依存性がないため、既存の測定システムの問題を解決することが可能である。

【考察】

最終的なアレイ型コンデンサ線量計の空間分解能は 1 mm 以下を想定しており、今回の簡易アレイ型線量計は 2.54 mm ピッチと分解能はそれほど高くない。また、1次元プロファイル測定器のように PCB 基板上で厳格に作成されたものではないため、測定精度が悪くなっている。したがって、正確な2次元線量分布を得るためには、測定回路が全て PCB 基板に実装されたアレイ型線量計で測定を行う必要があると考えられる。さらに、測定対象となるコンデンサの数が増えるため、FPGA の優れた並列処理を活かして、周波数測定を行う処理回路を増やした測定システムを構築する必要がある。

一方で、臨床で体内埋め込み可能な線量計を使用する場合、治療期間内に線量計の位置が変化すること、治療中には呼吸によって動くことを考慮する必要がある。そこで、線量計の角度ズレ・位置ズレを与えたところ、一定のズレまでは対応できることが判明した。測定が困難になる要因としては、コイルを貫く磁束方向が変化し、検出ピークの強度が下がるためだと考えられる。そこで、体外のコイルの配置をずらし、S21 の磁束の方向を変化させたところ、想定される3次元的なズレの全てで測定可能であることが確認された。したがって、実臨床においてもコイル線量計による「体内線量測定システム」は実現可能であることが示された。

【結論】

BaTiO₃を誘電体としたコンデンサは安価で小型であるため、様々な線量測定分野で利用できると考えられた。そこで、本研究では、コンデンサ線量計 (BaTiO₃誘電体) を利用した「安価で高分解能なアレイ型コンデンサ線量計の開発」と、「コンデンサ線量計を利用した体内埋め込み可能な線量計」についての研究が行われた。現段階で、測定システムの妥当性は示されており、どちらの線量測定システムについても実現可能性は十分に高いと考えられる。