

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24659552

研究課題名(和文)体内マーカ用金属コイルを利用した新しい体内線量測定法の開発

研究課題名(英文)Development of novel in-vivo dosimeter using implantable fiducial coil marker

研究代表者

石川 正純(Ishikawa, Masayori)

北海道大学・医学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80314772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、放射線治療における腫瘍近傍の体内マーカに非接触での積算線量計の機能を持たせた新たな体内マーカを開発することである。放射線照射によって誘電体の静電容量が変化することを利用し、体内に埋め込まれたマーカの共振周波数を測定することにより、マーカに照射された線量を非接触で測定できると考えた。アンテナコイルとネットワークアナライザを用いて、非接触でコンデンサの静電容量を測定し、1pF～100nFという非常に広い範囲においてLCRメータを用いた測定と近い数値が得られた。また、シミュレーションの結果から、20cm離れた位置でも信号が読み出せることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is developing implantable fiducial marker which has dosimeter function for cumulative absorbed dose with wireless measurement. By using capacitance change due to radiation irradiation, irradiated dose to marker can be measured by measuring resonant frequency of coil-capacitor system. A network analyzer-based measurement was performed to measure capacitance through an antenna coil, we succeeded in precise measurement for the capacitance ranging from 1 pF to 100 nF. Additionally, we conclude that wireless measurement of 20 cm distance is possible from simulation results.

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：線量計 体内線量 非接触測定技術 体内マーカ アンテナ

1. 研究開始当初の背景

北海道大学では、これまでに白土らによって開発された動体追跡装置による体内マーカの研究を行ってきた。従来は金球によるマーカをパターンマッチングにより認識していたが、同様に金コイルのような非球形のマーカでも追跡が可能である。近年、VISICOIL などの体内金属マーカが薬事認可となり、臨床での使用も可能となっている。

一方、金属はコイル状にすることにより、磁界に対して敏感に反応出来ることが知られており、金属をループ状にした構造はアンテナとしても利用されている。電気工学では、抵抗、コンデンサ、コイルの組み合わせで固有の共振周波数が決定される。そこで、放射線照射によって誘電体の静電容量が変化することに着目し、外部から非接触で共振周波数を測定することにより、積算線量を測定できると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、放射線治療における腫瘍近傍の体内マーカに非接触での積算線量計の機能を持たせた新たな体内マーカを開発することである。放射線照射に誘電体の静電容量が変化することを利用し、体内に埋め込まれたマーカの共振周波数を測定することにより、マーカに照射された線量を非接触で測定できると考え、その理論および計測方法の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 測定の原理

半導体等を用いた電子デバイスは、放射線によって損傷を受けることが知られている。電子デバイス的一种でもあるコンデンサも、その例に漏れず、放射線損傷によりその静電容量が変化する事象が報告されている。また、コンデンサとコイルで作成した回路は共振回路と呼ばれ、その回路固有の周波数を持った電磁波を発生させる。従って、コイルと一体化したコンデンサの容量が放射線損傷によって変化すれば、その固有周波数も変化する(図1)。つまり、その共振回路から発生する電磁波をアンテナで測定すれば、固有周波数の変化から静電容量の変化を知ることが可能である。静電容量の変化は積算線量に依存するので、この方法を用いれば、非接触で積算線量を測定する事が可能である(図2)。

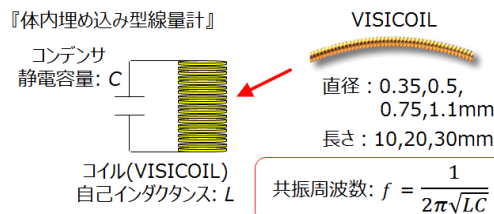


図1 金コイルをアンテナとした測定システム

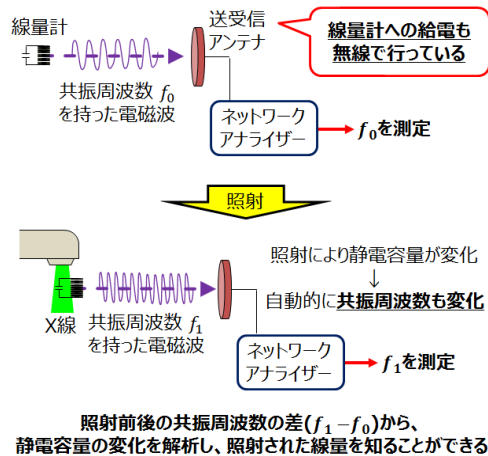


図2 測定原理とシステムの概要

(2) 装置

放射線照射装置

本研究では、放射線量とコンデンサの静電容量変化から、放射線の照射量を測定することを目的としているため、正確な線量照射が求められる。そこで、北海道大学アイソトープ総合センターに設置された医療用高エネルギーX線治療装置 (Varian Medical Systems 社製 Clinac 600C) を用いて照射を行った。照射条件を一定とするため、照射野は 10 cm × 10 cm とし、固体水ファントム (京都科学社製・タフウォーター) を用いて SSD (Source to Distance) を 100 cm、STD (Source to Target Distance) を 101.5 cm に固定し、後方散乱の影響を考慮して、コンデンサの下側に 10 cm の固体ファントムを設置した。ターゲット位置での線量は、医用原子力技術研究振興財団による校正を受けた Farmer 型電離箱 (PTW 社製 TM30013、S/N: 5747) および電位計 (PTW 社製 UNIDOS、S/N: 392) を用いて測定したところ、1.00203 cGy/MU であった。

LCR メータ

コンデンサの容量変化の測定には、LCR メータ (NF 回路ブロック株式会社製 ZM2371) を用いた。コンデンサの容量測定には 4 端子法を用い、インピーダンスを評価して、正確な静電容量を測定した。また、pF オーダーのコンデンサは浮遊静電容量と同程度の静電容量であるため、同じ静電容量のグループごとにオープン補正とショート補正を行い、ゼロ点を設定した。

(3) 方法

積層セラミックコンデンサに対する静電容量変化と静電容量の関係
静電容量の変化は、元の静電容量が大きいほど大きくなると期待されるため、静電容量変化と静電容量の関係を

調べた。静電容量が 1, 4, 10, 33, 100, 330 pF, 1, 3.3, 10, 33, 100 nF (計 11 種類) の積層セラミックコンデンサ (村田製作所社製・RHDL) 各 5 個に対して 40Gy の照射を行い静電容量変化を比較した。

ネットワークアナライザを用いた非接触静電容量測定の精度検証
 アンテナコイルとネットワークアナライザを用いて、非接触でコンデンサの静電容量を測定した。そのとき、リファレンスとなる静電容量は LCR メータを用いて有線で測定し、その結果と非接触での測定結果を比較することにより、測定システムの検証を行った。

VISICOIL を用いた場合の通信可能距離に関する検討
 実際の治療現場で利用されているコイル状の金マーカ (VISICOIL) をアンテナとして用いた場合を想定し、コイル線量計としての実現可能性について数値シミュレーションによる検討を行った。

4. 研究成果

(1) 積層セラミックコンデンサに対する静電容量変化と静電容量の関係

図 3 に静電容量ごとの静電容量の変化率を示す。1~100 pF では静電容量の変化がほとんど見られず、1~100 nF のみ静電容量に変化が見られた。静電容量が 100 pF 以下の場合、2%の静電容量変化があれば 2 pF の変化となるため、測定限界以下ではないと考えられる。10 pF 以下では、2%の静電容量変化があったとしても、0.2 pF の変化であり、検出限界以下となる。一方、100 nF での測定では、LCR メータの指示値が大きく変動していたため、結果として標準偏差が大きくなった。これは、コンデンサ容量が大きいため、安定まで時間を要したことなどが考えられる。

また、1 nF の積層セラミックコンデンサに対して 80 Gy の照射を行ったところ、約 3%の静電容量の変化を観測し、線量計として機能する可能性があることを確認した (図 4)。

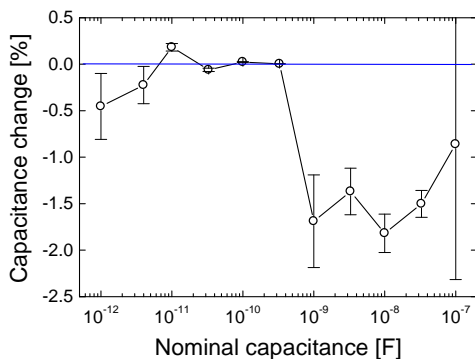


図 3 非接触測定の線形性評価

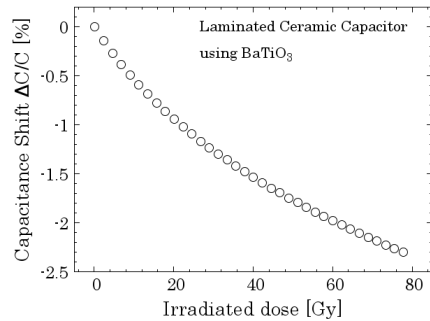


図 4 照射による静電容量変化

(2) ネットワークアナライザを用いた非接触静電容量測定精度検証

次に、ネットワークアナライザ (N/A) を用いた非接触測定の結果を図 5 に示す。生データでは、ネットワークアナライザを用いた測定結果は、LCR メータを用いた測定に対し、100pF 以下において線形性から外れる結果となった。これは、浮遊静電容量が原因と思われたため、測定系の浮遊静電容量を測定したところ 5.19pF という値耐えられたため、補正值として引き算を行った結果、非常に高い線形性が見られた。しかし、浮遊静電容量の補正のみでは、LCR メータによる測定値に対して、一律に 3.5%ほど低い値となっていたため、これは浮遊インダクタンスによる影響ではないかと考え、理論的考察から浮遊インダクタンス値を推定し、60.4μH を補正值として適用したところ、LCR メータを用いた測定とほぼ一致する結果が得られ、非接触での高精度な測定が実現した。

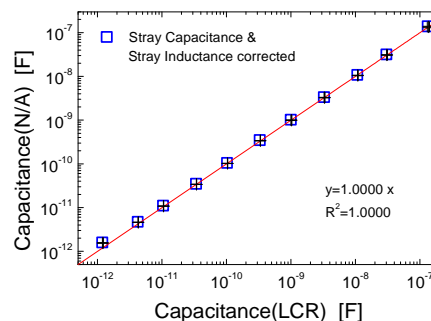
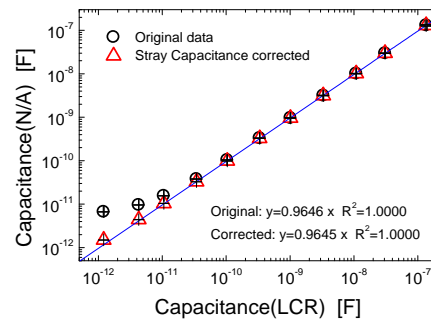


図 5 非接触測定の線形性評価 (上: 補正無と浮遊静電容量補正、下: 浮遊静電容量補正 + 浮遊インダクタンス補正)

(3) VISICOIL を用いた場合の通信可能距離に関する検討

アンテナコイルを用いた非接触測定では、信号が小さい場合測定が不可能になってしまう。信号の大きさは被測定対象のコイルの大きさや、アンテナコイルと被測定対象コイルの距離にも非常に強く依存する。臨床応用を考えると、体内に埋め込むコイルの大きさは微小な物となり、また20cm程度距離が離れても、信号の読み出しが可能である必要がある。従って、現在臨床応用されている VISICOIL の自己インダクタンスや構造を用いて、信号の読み出しが可能で限界距離を、電磁気学をベースにシミュレーションを行った。VISICOIL の構造は直径が 0.35、0.5、0.75、1.1mm の 4 種類を用いて行い、長さは全て 10mm と仮定した。

図 6 に標的(100 mmφコイル)の共振周波数を約 600kHz に固定した状態で、アンテナ側(200 mmφコイル)の周波数を変化させた時の、信号伝達強度を計算した結果を示す。また、図 31 に共振周波数を完全に一致させた状態で、共振周波数を変化させた場合の信号伝達可能距離を示す。図 6 から、遠方になればなるほど、共振周波数以外では観測が困難であることを示している。また、この場合では共振周波数 600kHz に対して、約 200kHz のズレで 10^{-2} の強度になっている。共振の強さは Q 値にもよるが、遠方まで観測するのならば、正確な共振は必要不可欠であると考えられる。

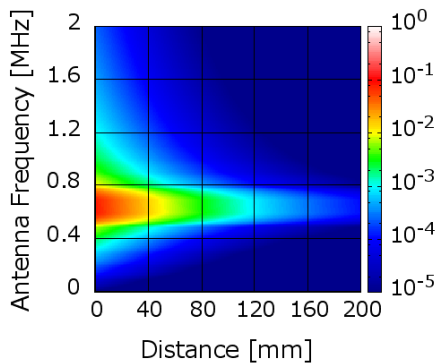


図 6 アンテナ周波数と通信限界距離の関係

一方、VISICOIL を用いた場合の通信可能距離について解析を行った結果、VISICOIL の直径は、0.35、0.5、0.75、1.1mm と非常に小さく、遠距離通信には適していないという結果が得られた。しかし、2 つのコイルの共振周波数を一致させ、共振モードで動作させた場合、直径 1.1mm の VISICOIL に対して、直径 200mm、長さ 30mm、巻き数 20 回という現実的な大きさのアンテナコイルで、270mm の通信が可能であるというシミュレーション結果が得られた(図 7)。

以上の結果より、体内における積算線量を測定する方法として、今までにない全く

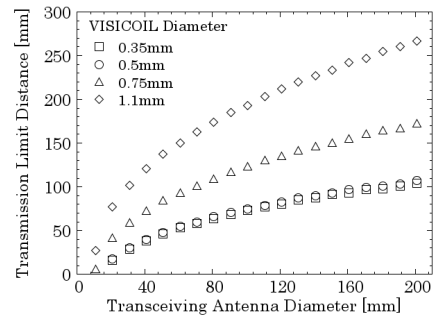


図 7 計算による通信限界距離の評価

新しい非接触測定システムを考案し、その測定方法が現実的に可能であることを実験的に証明した。また、臨床応用の可能性についてシミュレーションによる検討を行い、埋め込み可能な大きさでのマーカを用いた測定が可能であるという結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称：吸収線量測定システムおよび測定装置

発明者：石川 正純

権利者：国立大学法人北海道大学

種類：特許

番号：特願 2014-022502

出願年月日：平成 26 年 2 月 7 日

国内外の別：国内

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 正純 (ISHIKAWA Masayori)

北海道大学・大学院医学研究科・教授

研究者番号：80314772

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし