Title	金属球マーカーから放射される共振周波数を備えた球面イオン音響波(SPIRE)を用いた陽子線飛程のin vivo測定法に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	高柳, 泰介
Citation	北海道大学. 博士(医理工学) 甲第14549号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/81925
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Туре	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Taisuke_Takayanagi_review.pdf (審査の要旨)



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(医理工学) 氏名 髙柳 泰介

主査 准教授 髙尾 聖心

審查担当者 副查 教授 清水 伸一

副査 准教授 タ キンキン

副查 准教授 松浦 妙子

学位論文題名

金属球マーカーから放射される共振周波数を備えた球面イオン音響波(SPIRE)を用いた 陽子線飛程の in vivo 測定法に関する研究

(Studies on *in vivo* Proton Range Verification Methodology using Spherical Ionoacoustic Waves with Resonant Frequency (SPIRE) emitted from Fiducial Spherical Metal Markers)

陽子線治療は陽子線ビームの飛程特性により腫瘍への高い線量集中と周囲正常組織の線量低減 を実現する。しかし陽子線飛程の不確定性により一般に飛程の数パーセントのマージン付与が必 要となり、線量集中性の利点を相殺しかねないことが課題となっている。陽子線飛程の不確定性 の低減のため、飛程の in vivo 測定、すなわち飛程検証の実現が求められている。陽子線照射に伴 う媒質の断熱膨張によって生じる超音波を観測し飛程を推定するイオン音響法は、安価な音響検 出器で観測システムを構成可能な点から飛程検証の実現手段として注目されている。本研究は、 画像誘導放射線治療のために標的近傍へ刺入される金球マーカーに着目し、陽子線照射時に金球 マーカーから放射される共振周波数を備えた球面イオン音響波 (spherical ionoacousite wave with resonant frequency, SPIRE) の存在を予測し、数値計算及びビーム照射試験に基づく SPIRE 放射現 象の実証と SPIRE 放射現象を応用した新しい飛程検証法(SPIRE 法)の提案を目的とした。申請 者は始めに金球マーカーからの SPIRE の放射現象と SPIRE の物理的特性を波動方程式から導出 し、k-space 法に基づく数値計算による検証を行った。その結果、金球マーカーを発信源とし、理 論的に導かれる周波数と合致する 1.62 MHz の球面波、すなわち SPIRE 放射の存在が確認された。 続いて、固定磁場強収束加速器から出射される 100 MeV の陽子線ビームによる水中の金球マーカ 一からの SPIRE 放射現象の観測を行った。その結果、理論値に近い 1.53 MHz の SPIRE 放射が確 認された。また、ブラッグピーク線量が 0.4 Gy となる臨床相当の照射条件下において SPIRE の強 度は背景雑音に対して 10 倍以上であることが示された。さらに、SPIRE の強度と陽子線残余飛程 には線形の相関が認められ、SPIRE 法により 0.4 mm の精度で飛程を推定可能であることが示され た。

審査にあたり、まず副査の清水教授から、球形以外のマーカーに対する実現可能性についての 質問があった。申請者は、マーカー形状や材質により共振周波数が変化するため、使用するマー

カーに応じて計測系を構築する必要があると回答した。同時に、本研究で使用したハイドロフォ ンは焦点および周波数特性が今回の実験体系に対して適切に設計されているとの説明がなされた。 また、計測における加算回数に関する質問に対しては、加算せずとも一回の計測で十分な信号強 度が得られているとの回答があった。次に、副査のタ准教授から、不均質媒質中での SPIRE 計測 の可否に関する質問があった。申請者は、今回の数値計算および実験は水を用いているが、軟組 織であれば同様の結果が得られると推測されること、ただし骨等が存在する場合は計測が困難に なるとの説明があった。また、今回の計測において感度が優れていた理由に関する質問に対して は、ハイドロフォンがパラボラ形状であり収束性が高いためであるとの回答があった。続いて、 副査の松浦准教授から、SPIRE 法の光子線治療に対する適用に関しての質問があり、申請者は、 光子線は飛程特性を有しないが、SPIRE の共振周波数はエネルギーに依存するため、体内の線量 分布の推定には有効であると考えられると回答した。最後に、主査の髙尾准教授から、体内深部 における SPIRE 法の実現可能性に関する質問があった。申請者は、今回の実験における SPIRE の 信号強度を考えると体表から 5 cm 程度であれば現在の計測体系でも可能と考えられ、より深部の 場合は複数の検出器を用いるなどの工夫により測定精度を改善することが可能であると回答した。 以上、申請者は各質問に対し、自身の数値解析評価および実験結果、過去の報告および知見を 引用し概ね適切に回答した。本研究は、国内外の学会等において高く評価されており、現在の陽 子線治療における飛程の不確定性という最大の課題の解決に大いに寄与するものと期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、大学院課程における研鑚や取得単位なども併せ、

申請者が博士(医理工学)の学位を受けるのに充分な資格を有するものと判定した。