



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/
Type	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)



[Instructions for use](#)

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 高柳 泰介

	主査	准教授	高尾 聖心
審査担当者	副査	教授	清水 伸一
	副査	准教授	タ キンキン
	副査	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-margin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 ionoacoustic 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。申請者は最初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ーからの 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、主査の高尾准教授から、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鑽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十分な資格を有するものと判定した。