HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	スポットスキャニング陽子線治療におけるMRI 誘導の適用に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	藤井, 祐介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15182号
Issue Date	2022-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/87153
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	FUJII_Yusuke_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　藤井　祐介

審査担当者　主　査　准教授　松浦 妙子
副　査　教　授　富岡 智
副　査　教　授　加美山 隆

学位論文題名

スポットスキャニング陽子線治療における MRI 誘導の適用に関する研究
(Studies on spot scanning proton therapy system with MRI guidance)

近年、欧米を中心に普及の進む MR 画像誘導では、従来技術では難しかった照射中の腫瘍や周辺臓器の位置確認が、組織分解能のよい MR 画像により可能になる。腫瘍位置を描出しながら照射できるので、ターゲットに集中し周囲の正常臓器への線量投与を抑制できる。X 線治療においては既に MR 画像誘導の放射線治療装置が実用化され、臨床成績の向上も報告されている。X 線よりも線量集中性の高い陽子線においても、更なる副作用の低減を目指して MR 画像誘導陽子線装置の研究開発が進められており、近い将来に実用化が期待されているが、現状では技術的な課題も多い。
著者は、博士論文において、MR 画像誘導陽子線装置開発の根幹をなす二つの課題解決に向けた研究に取り組んだ。
課題の一つ目は、MR 装置の設置による陽子線軌道歪みやビーム輸送系への磁場の影響が存在する中で、いかにして従来の陽子線治療で達成された適応部位を縮小せずに照射要件を保つか、という点である。ここで、臨床的に重要となる照射要件として、1) 任意の方向から照射可能、2) 照射野 400 mm × 300 mm 以上、3) 視野サイズ直径 400 mm 以上、4) ビームサイズ 10 mm 以下の 4 点が挙げられる。 2) は小児の全脳全脊椎など長い標的を治療する際に必須の条件であり、3) は腫瘍と周辺重要組織が撮像範囲に収まるために必須である。また 4) は腫瘍に限局した線量分布を得るために満たすべき条件となる。
これに対して、先行研究ではトンネル型 MR 装置が主に研究されてきた。 トンネル型 MR の場合、トンネルを二つに分け、その隙間から陽子線を照射するが、二つに分けたトンネルは磁場により引き合うため、隙間を保持するための支持構造が陽子線の任意方向からの照射を妨げてしまうことが課題であった。また、照射野を確保するために磁極間距離を大きくする必要があるが、このことは MR 磁場に必要な磁場均一度の確保を困難にする。最後に、磁極間を繋ぐ磁性体がないことで漏れ磁場が大きくなると考えられるが、これによるビーム輸送系への影響が無視できないと考えられる。
これらの困難を克服するため、著者は鉄心を用いたオープン型 MR 装置をベースとし、MR 装置による陽子線軌道歪みを抑え、さらにビーム輸送系への磁場の影響を最小化するために、鉄ヨーク中央に陽子線を通すという、新しい装置構成を考案した。この装置構成は、数値解析的な段階ではあるものの、現時点で上述の照射要件を全て同時に満たすことが確認された唯一のものである。また、オープン MR の利点として、閉所恐怖症の患者にも対応でき、さらに技師や看護師が患者にアクセスしやすいなどの長所もある。これらの点を鑑みると、筆者の考案した装置は、現状の陽子線

治療の適応範囲を保ったまま臨床成績の向上に資することができるという意味で、陽子線治療工学に貢献するところ大なるものがあると考えられる。

筆者が取り組んだ二つ目の課題は、MR 画像誘導陽子線装置が形成する線エネルギー付与 (LET) 分布に関する特徴解析である。陽子線治療において、治療効果や副作用を予測するためには、患者体内に陽子線が形成した生物線量分布が用いられる。生物線量分布は、物理線量分布に対して、陽子線の LET の値で補正したものであるが、近年、陽子線照射後の副作用に関する複数の報告から、LET を考慮することの重要性が指摘されている。陽子線が MR 磁場下で体内に入射されると、横方向の線量分布が非対称に歪むことが先行研究によって知られていたが、生物線量に影響を与える LET 分布については手付かずの状況であった。筆者は、MR 磁場が陽子線のエネルギーを横方向に分散させることから、LET 分布にも歪みが生じる可能性を指摘し、広範囲の MR 磁場、陽子線エネルギー領域に渡り、LET 分布の特徴を解析した。この結果、診断装置として一般的に使用されている MR 磁場 (3 T) 程度では、LET は横方向に大きく歪み、磁場の影響は無視できないことが明らかになったが、一方で、筆者が提案したようなオープン MR 装置で用いられる低磁場 (0。3 T) では、歪みは殆ど問題にならない程度であることも明らかになった。この解析は、MR 磁場下の陽子線 LET 分布に関する初めての知見を与えるものであり、今後 MR 画像誘導陽子線が実用化する際に不可欠な情報となる。当該成果はアメリカ医学物理学会からも認められ、Medical Physics 誌の Editor’s choice として表紙を飾った。

上記を要するに、著者の考案した装置や磁場下の LET 解析は、陽子線治療成績を更に向上させ、医学的にも安全な治療を提供可能にするという意味で、陽子線治療工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。