



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                                                     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 陽子線スポットスキャンニング治療システムにおける応答関数法を用いた照射ノズル設計技術の開発 [論文内容及び審査の要旨]                                                         |
| Author(s)           | 上田, 英明                                                                                                              |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                               |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                                              |
| Dissertation Number | 甲第13210号                                                                                                            |
| Issue Date          | 2018-03-22                                                                                                          |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/69960">https://hdl.handle.net/2115/69960</a>                                   |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/</a> |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                     |
| File Information    | Hideaki_Ueda_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 (工学)                      氏名      上田 英明

審査担当者    主    査    特任教授    古坂 道弘  
                  副    査    教    授      梅垣 菊男  
                  副    査    准教授      松浦 妙子    ( 本学大学院医理工学院 )

## 学位論文題名

陽子線スポットスキャンング治療システムにおける応答関数法を用いた照射ノズル設計技術の開発  
(Development of a new nozzle design technique using angular distribution response-function method  
for spot-scanning proton beam therapy system)

この博士論文では、最初に陽子線スポットスキャンング治療法の治療計画を立てる上で必須となる、コミッショニングで得られた深部及び横方向の測定ビームプロファイルをモンテカルロシミュレーションで精密に再現する手法について述べている。照射ノズルを取り込んだシミュレーションをして詳細な検討を行っている。照射ノズルはビームを走査する電磁石、その絶対線量、位置、ビームプロファイルなどの測定を行う各種コンポーネントを取り付けたもので、ビーム経路に空気、He ガスなどがある。

さらにその手法を発展させ、ビーム線量分布を決めている照射ノズルでの散乱を、陽子ビームの位相空間情報のうち角度分散に注目してそれを解析するという新しい提案をしている。陽子ビームの線量分布が各コンポーネントでどのような散乱を起こし、最終的な線量分布にどのような影響を与えるか、さらに個々のコンポーネントからの線量の角度分布を三つのガウス分布の足し合わせの関数(トリプルガウッシャン)で精密に表現することで、最終的な線量分布がそれらの関数の畳み込みで表現できることについてまとめている。角度分布の情報を解析することで、個々のコンポーネントからの影響を分離して解析できるようになり、これまでより多くの情報を得ることができるようになった。その情報を用いることで新しいノズルの設計、あるいはコンポーネントの変更、追加の際の設計指針を与えることができるようになっている。

第1章では研究の背景及び既存の研究における課題と本研究の目的について述べている。

第2章では、アイソセンター近傍での線量の空間分布について議論している。気中の空間線量分布、及び水ファントム中での深部線量分布に関し、陽子線施設での加速器からの各入射エネルギーに対するコミッショニングデータを用い、ノズルに入射する陽子ビームの位相空間分布のパラメータを変化させながら、ノズルコンポーネント全てを考慮したモンテカルロシミュレーション計算を行っている。実測値と比較してモンテカルロシミュレーションの反復計算を行うことで、入射する陽子ビームパラメータを最適化することができ、その位相空間分布の精度の高い推定値を得ることができた。この手法により、これまでにない高精度の線量分布を再現することに成功している。

第3章では、照射ノズル中での散乱を、陽子ビームの位相空間情報のうち角度分散だけに注目して解析している。個々のコンポーネントに、角度分散が無い陽子ビームを入射した時の角度分散をモンテカルロシミュレーション計算で求め、それを三つのガウス分布の足し合わせの関数(トリプルガウッシャン)でフィッティングし、その関数型を決めている。この関数は個々のコンポーネン

トによる応答関数と見做すことができ、畳み込み積分で全体の散乱を表すことができることを示した。これにより、ビーム全体の広がり空気、軽原子核で構成される窓材などがその主要素であること、大角度散乱はビームプロファイルモニターなどに使われている、タングステンワイヤーからの寄与であることなどを明確に示すことができている。第4章では、第3章の散乱角度分布のデータに対して陽子エネルギーとの関係を分析し、散乱角度分布の広がり、陽子ビームの運動量と速度の積、 $pv$ 、に反比例することを示した。これにより、エネルギーに寄らずビームプロファイルは一つのユニバーサルな関数で表現できることが初めて示された。

第5章は第1章から第4章のまとめである。

以上をまとめると、まず、陽子線スポットスキニング治療での治療計画を立てる上で必須となる3次元線量分布計算に対し、モンテカルロシミュレーションを用いて測定プロファイルを精密に再現する手法を開発している。これにより入射陽子ビームエネルギー全てについて測定を行わないでも任意のエネルギーについて補間し、ビームコミッショニングにかかる期間を大幅に短縮することが可能となった。

また、各入射ノズルコンポーネントからの散乱の角度分布だけに着目し、これをシミュレーションで精密に再現した。これをトリプルガウッシャで表現することで応答関数と見做し、最終的な線量分布はその畳み込みで表現できることを示した。これにより、個々のコンポーネントでの散乱プロセスを正確に理解できるようになり、ノズルの設計指針に沿ってシステムティックな解析を可能とする新しいツールとしての使い方を提案できた。

これらの研究成果は博士の学位を与えるのに十分な非常に高い価値を持つものであり、医学物理分野、特に陽子線治療の研究分野に対して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があるものと認める。