



Title	動体追跡陽子線治療における照射ログファイルを用いた実績線量評価に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	山田, 貴啓
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医理工学)
Dissertation Number	乙第7181号
Issue Date	2023-06-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/90395">https://hdl.handle.net/2115/90395</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Takahiro_Yamada_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医理工学） 氏名 山田 貴啓

### 学位論文題名

動体追跡陽子線治療における照射ログファイルを用いた実績線量評価に関する研究  
(Studies on Evaluation of Actual Dose Distributions Utilizing Log Data  
in Real-time-image Gated Proton Therapy)

#### 【背景と目的】

陽子線治療では、標的を数千のスポットに分割して照射するスポットスキニング照射により、標的への線量集中性の向上や、線量分布形状の自由度が向上している。さらに、本学の陽子線治療装置では、体内マーカを用いた標的位置のリアルタイム監視により陽子線をゲート照射する動体追跡陽子線治療を実用化し、呼吸性移動臓器に対する高精度な照射を実現している。

一方、照射方法の高度化に伴い、照射精度の管理や検証に対する要求が高まっている。照射精度の検証として、照射時に記録されるログデータを用いる方法が注目されている。

本研究では、動体追跡陽子線治療におけるログデータの活用方法を検討する。本研究の第一の目的は、照射装置の誤差及び呼吸性移動を考慮した実績線量の再構成により、肝臓に対する動体追跡陽子線治療の線量分布を検証することである。本研究の第二の目的は、ログデータを用いた線量計算により患者 QA の測定時間を短縮する方法の検証である。

#### 【対象と方法】

実績線量分布の再構成に用いるログデータは、動体追跡装置に記録されるマーカ位置と透視 X 線のタイミング、陽子線治療装置に記録されるスポットの照射タイミング、Oncology Information System に記録されるスポットの照射位置及び照射線量のデータである。これらを同期することで、スポット毎の標的に対する位置ずれ及び照射線量のずれを実績スポットファイルとして作成する。この実績スポットファイルに基づき、治療計画装置を用いて実績線量分布を計算する。

実績線量分布の計算精度を実測と比較することにより検証した。検証条件として、単一エネルギーの平面照射野を照射し、二次元計測器により二次元線量分布を計測した。二次元計測器は、照射野と干渉しない位置に金マーカを貼り付け、動体ファントム上に設置する。照射中は動体追跡装置により金マーカの位置を計測する。ログデータを用いて再構成された実績線量分布は実測の分布とガンマ解析により一致度を比較した。

肝臓に対する動体追跡陽子線治療の線量分布の検証の為に、2016年5月から2017年3月までに治療された8ケースに対して実績線量分布を評価した。これらの8ケースに対して、全168フラクションのログデータに基づき実績線量分布を再構成した。実績線量分布を評価する線量指標として、CTVの最大線量、最小線量、D99、D5-D95及び、MLDを評価した。t検定により計画と実績線量の同等性を検証した。また、胃や腸管などのMLD以外の線量制約に関しても実績線量を評価した。

ログデータを用いた線量計算による患者 QA の測定時間短縮では、データ転送の完全性を検証するデリバリ検証を実施時に取得したスポット照射位置及び照射線量のログデータに基づき水中の実績線量分布を計算する。この実績線量分布を治療計画による分布と比較することで、線量分布形状及び絶対線量を検証する。これにより陽子線の照射はデリバリ検証時の1回のみとなり、測定時間短縮が可能となる。実績線量分布の計算には、治療計画装置とは独立した線量計算アルゴリズムとして Simplified Monte Carlo (SMC法) を用いる。

SMC法を用いた患者 QA 省力化の実現性を評価する為に、実測による線量分布と比較する

ことで計算精度を検証した。立方体照射野と、実際の患者 QA で計測された 8 例 (20 照射野, 58 計測条件) の線量分布を用い、線量分布形状及び絶対線量を評価した。

#### 【結果】

実績線量分布の計算精度の検証では、動体ファントムの動きにより発生する線量分布の乱れや照射野内部の高線量領域を含む線量分布を実績線量分布が良く再現することを示した。ガンマ解析のパスレートは許容誤差 1mm, 1%では 97.3%, 2mm, 2%では 100%であった。

肝臓がん動体追跡陽子線治療の実績線量分布評価では、計画線量分布と比較して実績線量分布の CTV の最大線量は有意に増大した ( $p=0.003$ )。一方、CTV の最小線量の変化は小さく、計画値と実績値に有意差はなかった ( $p=0.7$ )。CTV の線量範囲を 95%から 107%に制限する ICRU 基準を 7 ケースで達成した。この基準を逸脱したケースでは、実績線量分布の最大線量が 107.6%となった。ただし、このケースは計画線量分布における最大線量が 106.5%と、元々値が大きい計画であり、最大線量の増加分は 1.1%と大きくなかった。MLD に関しては、実績線量分布は計画線量分布をよく再現した。D5-D95 に関しては、有意に増加したが、平均値の増加量は 0.5%であった。その他の制約条件に関しては、全ケースの実績線量分布が制約条件を満足することを確認した。

SMC 法による実績線量分布の計算精度に関しては、立方体照射の二次元線量分布を許容誤差 2mm, 2%ガンマ解析で評価した結果、SOBP 内の 100 - 200mm の 11 面において、パスレートは最大 100%、平均 99.1%、最低 96.8%であった。実際の患者 QA における二次元線量分布を許容誤差 2mm, 2%ガンマ解析で評価した結果、パスレートは最大 100%、平均 99.7%、最低 97.3%であった。絶対線量精度は、エネルギー毎に設定可能な補正係数を調整することで、誤差±2%以内を実現した。

#### 【考察】

実測との比較による実績線量分布の計算精度検証では、標的に動きがある場合であっても、本研究によるログデータに基づく実績線量分布の再構成により、動体追跡陽子線治療の実績線量分布を高精度に評価可能であるという事が示された。

肝臓がん動体追跡陽子線治療の実績線量分布評価では、計画線量分布と比較して、実績線量分布の線量指標は、CTV の最大線量と D5-D95 に関して有意な増加が見られた。一方、CTV の最小線量及び D99, MLD には有意差が見られなかった。最大線量及び D5-D95 が増加したケースでは、最大線量は照射野の深部端の辺縁に発生した。この領域では、スポット毎の照射線量が他のスポットより大きく、線量分布はスポット位置や標的位置の影響を受けやすい。高線量域の発生により CTV 内の最大線量が増大し、更に最小線量の変化が小さかったことから、D5-D95 が増大したと考えられる。

SMC 法による実績線量分布は実測による線量分布との高い一致度が示された。ただし、低エネルギー領域において、低エネルギーほど SMC 法の絶対線量が大きくなるという傾向がみられた。線量分布形状の検証において、低エネルギー領域では、実測と比較して、SMC 法による線量分布の横方向の広がり小さい傾向がみられている。このことから、横方向の広がりが小さいことにより、照射野中心の線量が高く計算されていると考えられる。対策としては、ビームサイズの修正による補正が有効であると考えられる。

#### 【結論】

肝臓がん動体追跡陽子線治療は、CTV の最小線量、D99 及び MLD に関して、ウィンドウ幅 ±2mm のゲート照射により、治療計画と同等の線量分布を実現できることが示唆された。また、CTV の最大線量、D5-D95 に関しては、治療計画と比較して有意に増大するが、その増加量は 1%程度であり、インタープレイ効果による線量分布の乱れが抑制されることが示唆された。

スポットごとの位置と照射線量のログデータに基づく SMC 法により求められる水中の線量分布は、実測と比較して、相対線量分布は許容値 2%, 2mm のガンマ解析においてパス率 95%以上であり、絶対線量精度は±2%以内であることが示唆された。