

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主論文の要旨

論文題目 前立腺がん放射線治療における  
寡分割照射法の物理的および技術的検討

氏名 富田 真司

## 論文内容の要旨

### 【背景・目的】

近年、欧米諸国において、前立腺がんに対して定位放射線治療（寡分割照射法）が適応され、その初期臨床成績が報告されている。定位放射線治療では、照射回数が著しく減少するため、1回の照射における計画線量と実際に照射された線量の相違が、治療成績に大きく影響する可能性がある。その線量相違の要因として、患者の体型変化や対象臓器の変位など患者側に由来するものと、放射線治療計画装置の計算精度や放射線治療装置の照射精度など装置側に由来するものに大別される。

前立腺がんの放射線治療では、内分泌療法が併用されることがあり、それにより前立腺の体積が減少することが知られている。放射線治療期間中の前立腺体積の減少は、周囲の正常組織に対する想定外の線量投与につながるおそれがある。しかしながら、放射線治療における治療期間中の前立腺体積変化が考慮されることは少なく、日本人においてどの程度の前立腺体積の減少が生じうるか定量的に評価する必要がある。

また、前立腺がん定位放射線治療の報告の多くは、ロボットアーム型医用直線加速器を使用したものである。ロボットアーム型医用直線加速器は、これまで円形もしくは擬似的な円形の照射野形状しか成形することができなかったが、より自由度の高い照射野形状を成形できるマルチリーフコリメータが新たに実装された。マルチリーフコリメータの有用性は、治療時間の短縮やリスク臓器の線量抑制など、主に治療計画シミュレーションに関する項目を中心にすでに報告されているが、マルチリーフコリメータを用いて実際に治療が行われた報告は未だ無い。臨床適応するためには、治療計画だけでなく実機による評価を勘案した総合的な照射精度を把握することが重要となる。

本研究の目的は、照射誤差を誘引する患者側の前立腺体積の変化および放射線治療装置側のロボットアーム型医用直線加速器におけるマルチリーフコリメータの有用性を評価することにより、前立腺がん定位放射線治療の安全で効率的な実施につながる物理的および技術的な検討を行うことである。

### 【方法】

#### 放射線治療期間中における前立腺の体積変化

内分泌療法併用の放射線治療を行った日本人患者 19 名に対し、内分泌療法の開始から放射

線治療計画用の横断画像撮影までの期間によって短期間群，中期間群，長期間群に群分けを行った。治療期間中においては，位置照合のために横断画像を取得し，前立腺の輪郭を描出することによって体積を算出した。

#### ロボットアーム型医用直線加速器におけるマルチリーフコリメータの有用性

基礎的な評価として，固定コリメータ，可変コリメータ，マルチリーフコリメータの3種類のコリメータ（Figure 1）によって成形された定型的な照射野に対し，軸外線量比および半影領域幅の測定値と計算値の相違を評価した。臨床的な評価として，10名の前立腺患者を対象に定位放射線治療（36.25 Gy/5回）を模擬した治療計画を固定コリメータ，可変コリメータ，マルチリーフコリメータそれぞれの使用により立案した。その治療計画におけるビーム数，総モニタユニット値，推定治療時間のパラメータ，計画標的体積やリスク臓器の線量指標をコリメータ間で比較した。実際に模擬した治療計画における照射精度の評価では，ラジオクロミックフィルムおよび電離箱線量計を挿入した固体ファントムに対し，それぞれ立案した治療計画を照射した。フィルムを用いた線量分布検証では，線量差3%，等線量一致距離2 mmの判定基準をもったガンマ解析によって評価を行った。

#### 【結果】

##### 放射線治療期間中における前立腺の体積変化

放射線治療期間中における前立腺体積の推移を各群の平均値で示したものをFigure 2に図示する。放射線治療計画用の横断画像撮影時と比較して，36回目の放射線治療時には，短期間群では7.8%，中期間群では2.0%，長期間群では1.7%の減少率が観察された。

##### ロボットアーム型医用直線加速器におけるマルチリーフコリメータの有用性

定型的な照射野の検討において，軸外線量比に対する測定値と計算値の平均線量相違は，従来のコリメータよりもマルチリーフコリメータで大きい結果となった。マルチリーフコリメータにより成形した小さな照射野では2%を超える照射野もみられた。半影領域幅における測定値と計算値の相違は，マルチリーフコリメータのリーフ移動方向と平行方向で平均0.2 mm，垂直方向で平均0.3 mmであった。一方，従来のコリメータでは，0.1 mmを超える相違はみられなかった。

前立腺がん定位放射線治療において，それぞれのコリメータにより立案した結果のパラメータをTable 1に示す。マルチリーフコリメータによって立案した治療計画の総モニタユニット値は，従来のコリメータの治療計画と比較して，約27%減少することが示された。また，推定治療時間について，マルチリーフコリメータの治療計画は，固定コリメータよりも31%，可変コリメータよりも20%短縮する結果となった。計画標的体積およびリスク臓器が受ける線量指標において，マルチリーフコリメータを使用することで，膀胱のV50%を他のコリメータよりも約30%抑えることができたが，他の線量指標に関しては，コリメータ間で統計学的な有意差はみとめられなかった。

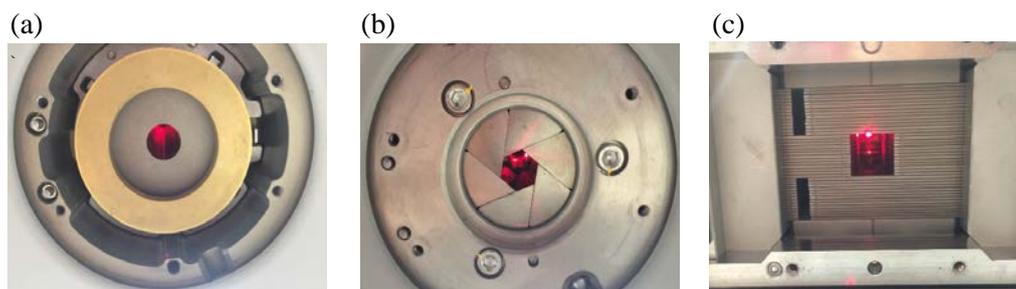


Figure 1. コリメータ外観 (a) 固定コリメータ，(b) 可変コリメータ，(c) マルチリーフコリメータ

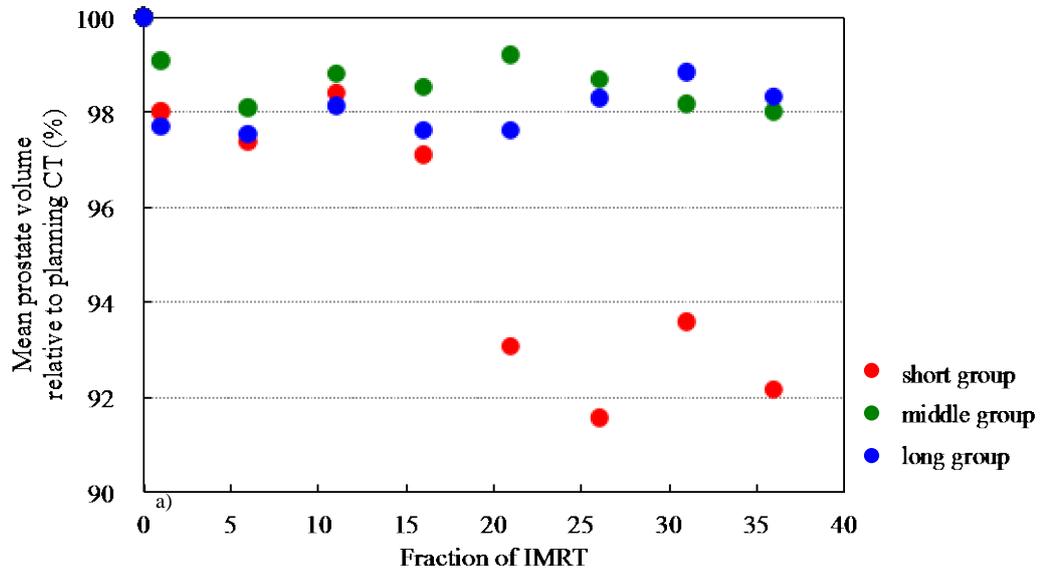


Figure 2. 各群における放射線治療期間中の前立腺体積変化率の推移.

a) Fraction #0 = 放射線治療計画用横断画像撮影時

Table 1. コリメータごとによる放射線治療計画パラメータの比較

Collimator	Number of beams	Total MU (10 <sup>3</sup> )	Estimated treatment time (min)
Fixed	177 ± 31 *	36.2 ± 2.8 *	46 ± 4 *
Variable	187 ± 34 *	36.4 ± 2.3 *	40 ± 3 *
MLC	127 ± 35	26.3 ± 3.0	32 ± 4

\*, \* p < 0.05

臨床的評価におけるフィルムを用いた線量分布検証のガンマ解析の結果を、コリメータごとに Figure 3 に図示する。パス率が矢状面において固定コリメータは 99.5±0.5%，可変コリメータは 99.7±0.4%，マルチリーフコリメータは 97.1±2.0%であった。同様に、冠状断面においてはそれぞれ、98.0% ± 2.2%，98.7% ± 1.2%，95.2% ± 2.8%であった。ガンマ解析パス率について、マルチリーフコリメータの結果は従来のコリメータの結果に及ばないことが明らかとなった。また、電離箱線量計を使用した絶対線量検証では、コリメータによらず測定値と計算値の線量相違が 3%を超えるものはみられなかった。

【考察・結論】

内分泌療法を併用した前立腺がんに対する放射線治療において、前立腺体積の減少率は欧米諸国から報告されているものと比較して本研究の結果は小さく、定位放射線治療では照射回数が著しく減少するため、さらにその影響は限定的であると推察される。

また、本研究の結果は、前立腺がん定位放射線治療の治療計画においてロボットアーム型医用直線加速器に実装されたマルチリーフコリメータの有用性を明らかにするものであった。特

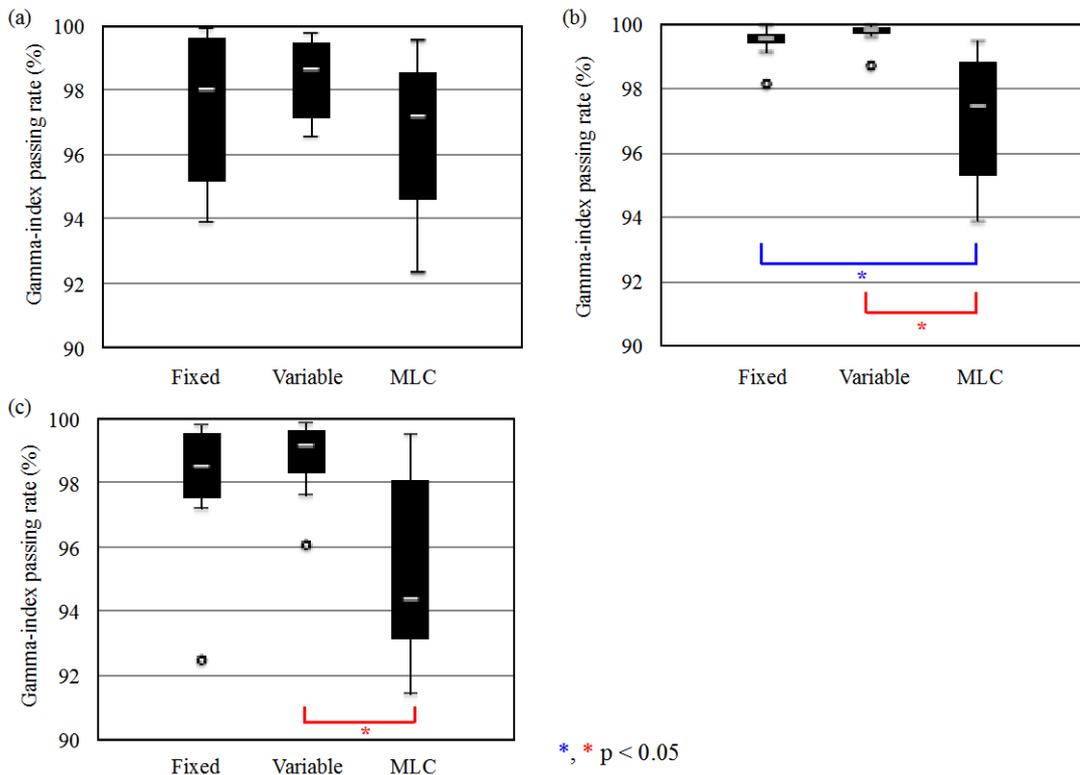


Figure 3. 臨床的精度検証におけるガンマ解析のコリメータ間比較  
(a) 横断面, (b) 矢状断面, (c) 冠状断面

に、ビーム数および総モニタユニット値、推定治療時間に関して、従来のコリメータよりも明らかに減少した。しかしながら、実際に模擬した臨床的評価であるフィルムを使用した線量分布検証において、マルチリーフコリメータのガンマ解析パス率は、従来のコリメータに及ばない結果であった。基礎的な評価でもみられたように、従来のコリメータに及ばないマルチリーフコリメータのモデリングを含んだビームモデリング精度がこの結果に影響したと考えられる。一方で、電離箱線量計を使用した絶対線量検証では、コリメータによらずすべての症例で測定値と計算値の線量相違が3%を超えるものはなかった。ロボットアーム型医用直線加速器に実装されたマルチリーフコリメータのこれらの特徴を考慮し、前立腺がん定位放射線治療に用いるかどうか施設ごとに判断する必要があると考えられる。