

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19591452

研究課題名（和文） 陽子線治療におけるボラス形状の最適化の研究

研究課題名（英文） Optimization study on range-compensating bolus in proton therapy

研究代表者

高田 義久 (TAKADA YOSHIHISA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号：00134205

研究成果の概要（和文）：陽子線治療の照射野形成に広く用いられている二重散乱体法と Wobbler 法において、線量分布を照射標的の深部境界に合致させるための照射器具であるボラスを設計する新たな方法として、照射標的とその周辺に目標線量を設定することで目的の分布を達成するように自動的にボラス形状を最適化する手法を開発し、いくつかの幾何学的ファントムに対してその有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：We have developed an optimization method of the range-compensating bolus to obtain an optimum shape of the bolus satisfying a prescribed dose distribution inside and around the target volume automatically. We applied this method to a number of geometrical phantoms and verified the effectiveness.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
平成 20 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
平成 21 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：粒子線のがん治療のための照射技術開発

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：粒子線治療、照射技術

## 1. 研究開始当初の背景

陽子線治療の照射野形成に広く用いられている二重散乱体法と Wobbler 法では、静的あるいは準静的に照射標的を覆う大きな照射野を形成できるため呼吸性移動を伴う臓器にも安全に適用できる。これらの手法では、線量分布を照射標的の深部境界に合致させるための照射器具であるボラスが

使われてきたが、その設計法は Ray-tracing model に基づき散乱を考慮していないため、実際に最適な Bolus 形状を得るには物理の知識が必要でありまた時間のかかる線量分布計算を繰り返すなどの試行錯誤が必要である。照射標的とその周辺に目的とする線量分布を作る Bolus 形状が自動的に求められれば照射野形成の質の

向上と治療準備時間の節約や作業量の軽減につながるものと期待される。

## 2. 研究の目的

そこで我々は、実際の陽子線治療の照射野形成法として使われているブロードビーム法（二重散乱体法と Wobbler 法）に対して、照射標的内とその周辺に目標線量分布を与えて、それを近似的に満たすような Bolus 形状を自動的に求める方法を開発することで、Bolus 設計の自動化、省力化と線量分布の精度向上を目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) Wobbler 法における Bolus 形状最適化

①高速・高精度・線量計算を可能にする線量計算モデルの確立：Bolus 要素(横断面 5 mm□で厚さ  $t_j$  が可変)を通過する陽子線の水中線量分布  $d_{ij}(t_j)$  を解析的な式[雑誌論文②]を使って計算し、Bolus 要素の位置、厚さ、水中深度パラメータを離散的なパラメータ空間上のサンプル点で計算し、その分布を簡単な 2 次元ガウス型 Penumbra 関数で Fit し、その Fit パラメータをデータベース化し、任意のパラメータの値を補間で求め、そのパラメータを使って線量分布を高速・高精度で計算する。

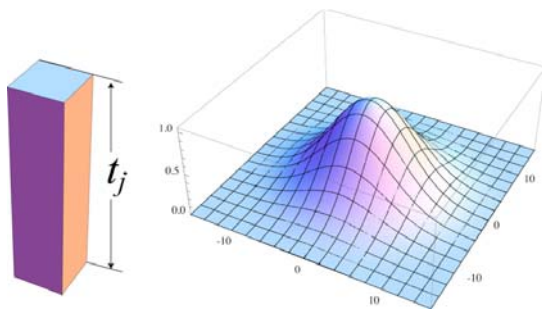


図1: Bolus 要素 (左) を通過する陽子が水中の特定の深さで作る線量分布 (右)

②照射標的内とその周辺での目的線量を定め、Bolus を Bolus 要素の集合と見なし各 Bolus 要素の厚さ( $t_j$ )を目的線量( $P$ )と計算線量( $D$ )の差の二乗の和を最小にするように求める。このとき各線量計算点の重み( $g_i$ )を指定できるようにして最適化の自由度を持たせる。

$$\chi^2 = \sum g_i (P_i - D_i)^2 \rightarrow \text{Min.}$$

$$D_i = \sum_{j=1}^M d_{i,j}(t_j)$$

$d_{ij}(t_j)$ :  $j$  番目の Bolus 要素が  $i$  番目の位置に与える線量

③実際に幾何学的ファントムに対応する Bolus を製作し、それを通過する陽子線の水中での線量分布を多チャンネル 1 次元平行平板電離箱により測定する。検出器を水中

で深度方向にスキャンして側方-深度方向の 2 次元分布を測定する。測定した分布と計算した分布と比較してこの手法の有効性を確認する。

(2) 二重散乱体法における Bolus 形状最適化：①高速・高精度・線量計算を可能にする線量計算モデルの確立：Bolus 要素(横断面 5 mm□で厚さが可変)を通過する陽子線の水中線量分布を解析的な式を使ってピークをよぎる  $x$  方向と  $y$  方向の直線上のサンプル点で計算し、その直積で 2 次元線量分布を計算する。上記の線量分布を、Bolus 要素の位置、厚さ、水中での線量計算深度のサンプル点ごとに計算しデータベース化し、任意の条件での線量分布を計算する。②照射標的内とその周辺での目的線量を定め、Bolus を Bolus 要素の集合と見なし各 Bolus 要素の厚さを目的線量と計算線量の差の二乗の和を最小にするように求める。このとき各線量計算点の重みを指定できるようにして最適化の自由度を持たせる。

## 4. 研究成果

### (1) Wobbler 法における Bolus 形状最適化

①高速・高精度・線量計算を可能にする線量計算モデルの確立：図 2 に研究方法(1) ①で述べた方法で計算したいくつかの場所に置いた Bolus 要素 (厚さも異なる) を通過した陽子線が作る水中での線量分布を示す。

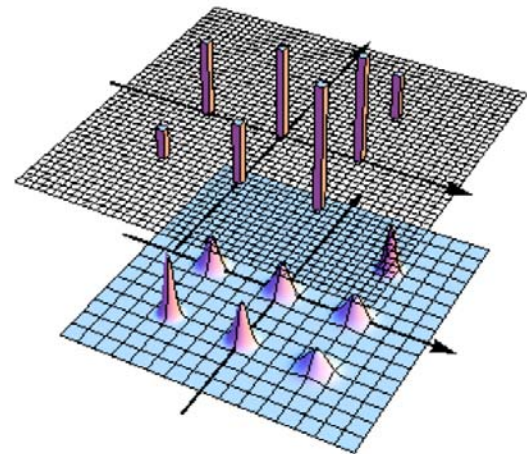


図2: Bolus 要素を通過した陽子線の線量分布

②図 3 に示す 2 次元幾何学的ファントムに対して、図 4 に示す線量評価点に目標線量値と重みを与えて Bolus 形状を最適化して得られた Bolus 形状を図 5 に示す。図 6 には、この Bolus を通過する陽子線の水中での線量分布を表わす。図 7 は、この線量分布により得られる標的内と標的外の線量体積ヒストグラムを表わす。

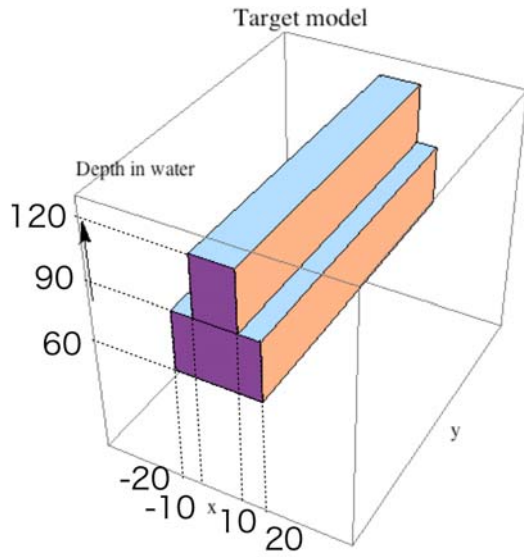


図3：水中での2次元幾何学ファントム

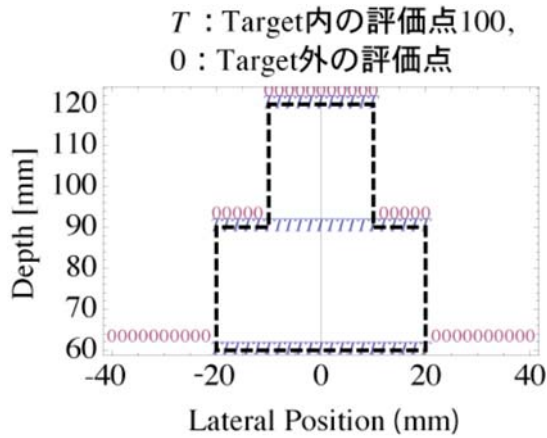


図4：線量計算点と目標線量値

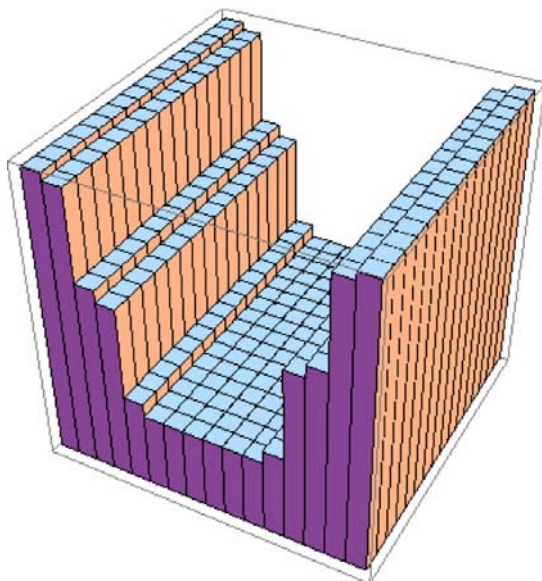


図5:最適化された Bolus 形状

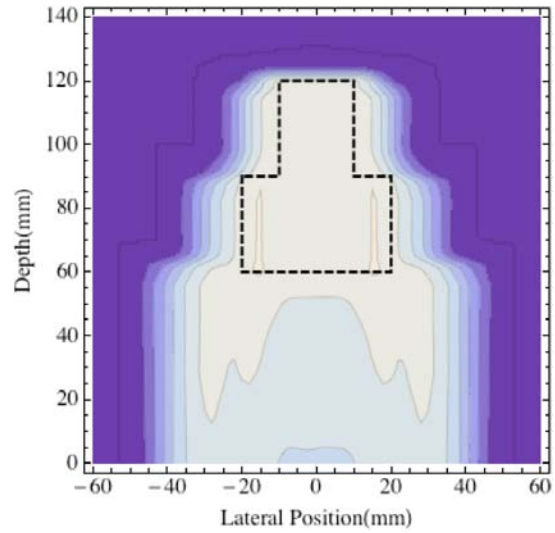


図6: 図5の Bolus 通過後の水中での線量分布の等線量曲線

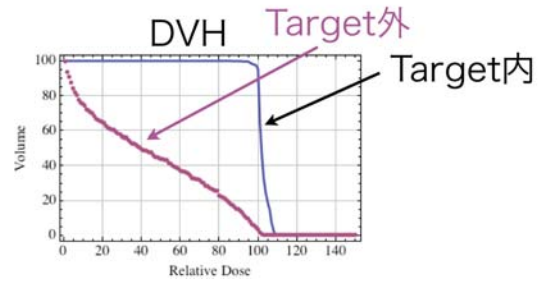


図7：照射標的内外の線量体積ヒストグラム

③幾何学ファントムに対する Bolus を通過した水中線量分布の測定：図8には、3次元構造を持つ傍脊椎腫瘍を模した RTOG ファントムを示す。図9は、ファントムに対応する Bolus (右側の写真)を通過した陽子線の水中線量分布(左は側方-深度等線量曲線、真中は、その側方分布)を Bi-material bolus (上)と Single-material bolus (下)の場合について示した。

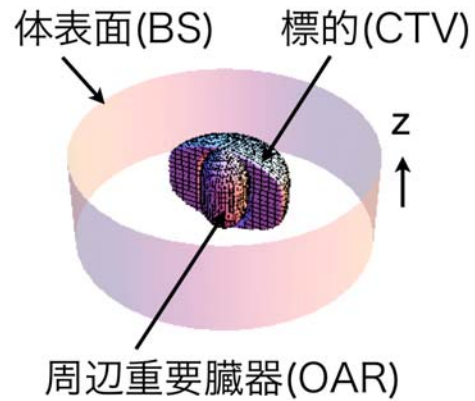


図8: RTOG3次元ファントム



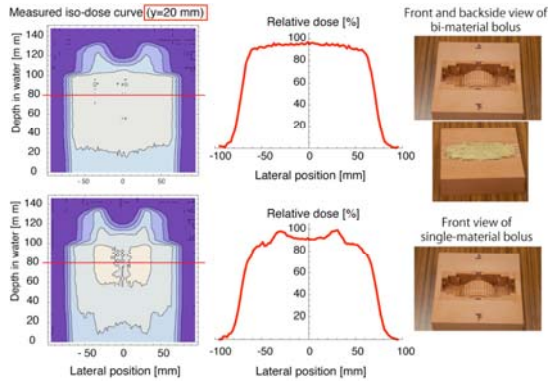


図 9: 3次元 RTOG phantom 用 Bolus 通過後の線量分布(測定値)比較。

上: Bi-material bolus, 下: Single-material bolus  
 左: 側方-深度等線量曲線、中: 側方分布  
 右: Bolus の写真

計算した線量分布は測定した分布を良く再現した。

(2)二重散乱体法における Bolus 形状最適化: ①最適化手法で求めた、3次元幾何学的ファントム(図 10)に対応する Bolus 形状を図 11 に示す。この Bolus を通過した陽子線が水中で形成する線量分布を図 12 に示す。

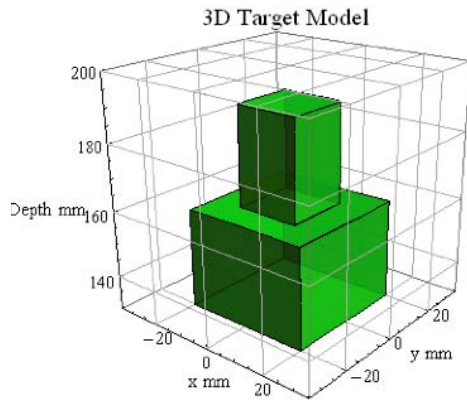


図 10: 3次元幾何学的ファントム(水中)

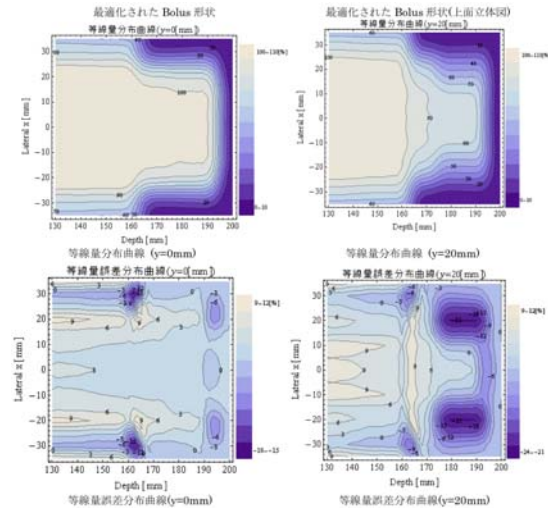
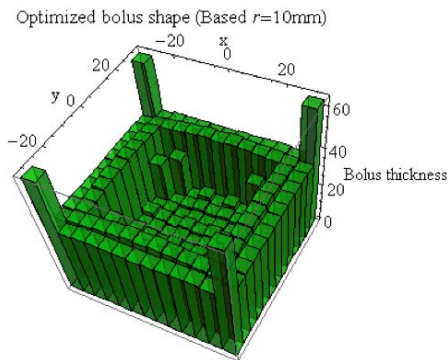


図 11: 最適化した Bolus 形状

図 12: (上) 深度-側方等線量分布(計算線量)(左:  $y=0$  mm 断面、右:  $y=20$  mm 断面)。(下)(計算線量-目標線量)の深度-側方等線量分布

図 13 上段に、標的内外の線量体積ヒストグラム(DVH)を、中段下段にいくつかの水中深度における Lateral 分布を示した。

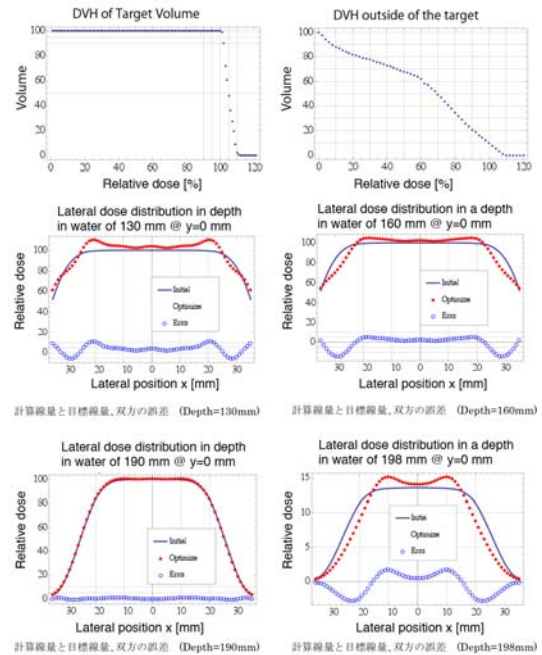


図 13 DVH と Lateral 分布

Single-material bolus では、散乱の不均一による線量不均一、ビームの角度分布による Penumbra は原理的に避けられないことに留意すべきである。以上を勘案すると、これらの結果から、二重散乱体方式でも、目標線量分布を近似的に再現する Bolus の最適化が可

能であることが分かる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① K. Hotta, R. Kohno, Y. Takada, et al., Improved dose-calculation accuracy in proton treatment planning using a simplified Monte Carlo method verified with three-dimensional measurements in an anthropomorphic phantom, 査読有, Phys. Med. Biol. **55** (2010) 3545–3556.
- ② Takada Y, et al., Basic study of bi-material range compensator for improving dose uniformity for proton therapy”, 査読有, Phys. Med. Biol. **53** (2008) 5555-5569.
- ③ Himukai T, Takada Y, et al., Analytical design method of ridge filters for wobbling proton beam, 査読有, Jpn. J. Med. Phys. **28** No. 2 (2008) 57-69.

[学会発表] (計 17 件)

- ① Y. Takada et al., Application of a bi-material range compensator to a RTOG phantom for proton therapy, The 49<sup>th</sup> Particle Therapy Cooperative Group Meeting, Sept.28 – Oct.3, 2009, held in Heidelberg, Germany.
- ② 二瓶哲哉、高田義久 他 6 名, Bolus を通過した陽子線が作る線量分布の高速計算法の開発 (Wobbler 法), 第 98 回日本医学物理学会学術大会, 2009. 9. 17-19, 京都
- ③ 原洋介、高田義久 他 6 名, Bolus が炭素線の線量分布に及ぼす影響, 第 97 回日本医学物理学会学術大会, 2009. 4. 17-19, 横浜
- ④ Takada Y, Himukai T, et al., Fast Calculation Method of Dose Distribution in Water Formed by Protons Traversing a Range Compensator in a Beam-Wobbling Method for Proton Therapy, Proc. of the 5<sup>th</sup> Korea- Japan Joint Meeting on Medical Physics, held in Jeju, Korea, Sept.10-12, 2008, SS3-R1-5, p.119.
- ⑤ Hotta K, Takada Y, et al., Improvement of Beam-Use Efficiency for Double Scattering Method in Proton Therapy, Proc. of the 5<sup>th</sup> Korea- Japan Joint Meeting on Medical Physics, held in Jeju, Korea, Sept.10-12, 2008, Y1-R1-5, p.62.
- ⑥ 木村太亮、高田義久、他, 陽子線治療における二重散乱体法を用いた Bolus 通過後の水中線量の高速計算, 第 56 回応用物理学関係連合講演予稿集, p. 193、つくば、2009. 3. 30-4. 2
- ⑦ Takada Y, et al., Bi-material range compensator for improving dose uniformity for proton therapy, Proc. of PTCOG46, held

in Zibo, China, May 18-23, 2007, P18.

- ⑧ 高田義久、他, Wobbler 法における Bolus 通過後の陽子線の水中における水中での線量計算モデル, 医学物理 **27** 卷 Sup. 2, 第 93 回日本医学物理学会学術大会報文集, pp. 145-146, (2007). (第 93 回日本医学物理学会学術大会、横浜、2007. 4. 13-15.)

[その他]

ホームページ等

<http://taklabo.bk.tsukuba.ac.jp/~takadalabo/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

高田 義久 (TAKADA YOSHIHISA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授  
研究者番号：00134205