

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12102  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22611004  
 研究課題名（和文） 陽子線治療におけるモニターユニット値の高精度計算法の開発研究

研究課題名（英文） Research and development for accurate calculation method of monitor unit for proton therapy

研究代表者

高田 義久 (TAKADA YOSHIHISA)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：00134205

研究成果の概要（和文）：従来、患者毎に測定で行われていた線量校正を、照射機器条件（エネルギー、SOBP 幅、レンジシフト量）に対する一連の測定データを基にした因子と、簡易モンテカルロ法によるボラス、コリメータ条件等患者固有の条件毎に計算した因子を掛け算して計算だけで求める方法を開発し、陽子線治療された前立腺がん患者の 32 門の照射条件に対して最大誤差 1.6%以内で測定結果を再現することを実証しこの方法の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a calculation method of monitor units for proton therapy as a product of a factor related to measured data of a part of beam delivery condition (beam energy, SOBP width, range shift) and the other factor related to patient-specific condition calculated by a simplified Monte Carlo calculation. We found effectiveness of the method by showing that it reproduces the measured data within a maximum error of 1.6% for 32 different irradiations to prostate carcinoma treated by proton beam.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：医学物理学

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：陽子線治療、照射技術

### 1. 研究開始当初の背景

陽子線治療において患者へ付与する線量は、照射装置内の透過型電離箱のモニターユニット値(MU 値)により管理されている。照射条件毎に MU 値と照射中心の線量の比として定義される線量校正因子が変化するため、現在は患者の照射を行う前に、患者の照射条件

を模擬したセットアップでビーム照射を行い、患者の照射位置に置かれた校正された指頭型電離箱を用いてビームライン上に置かれた透過型電離箱の MU 値の校正を行い、患者線量校正因子 ( $CALF_{pat}$ ) を測定で求めている。しかし治療患者数が増えるにつれ、この

作業は大きな負荷になっている。この  $CALF_{pat}$  を測定代わりに計算により正確に求められれば、患者の照射前の準備作業を軽減し治療の効率を向上させることが期待できる。

## 2. 研究の目的

そこで我々は、患者線量校正因子が汎用な照射野形成機器の設定値と患者毎に異なる個別な機器に依存することに注目した。そして汎用な照射野形成機器に設定の組み合わせが限られるので一連の測定によりデータ取得するとともに、患者固有の照射器具条件に対しては個別に計算を行い、それらを組み合わせ、計算だけにより線量校正係数を求める手法を開発することで治療前準備の作業を軽減することを目的にする。

## 3. 研究の方法

ブロードビーム照射法の一つである二重散乱体法では第1, 第2散乱体を使ってLateral 方向に様なフルエンス分布を作る。またRidge filter (RF) を使って拡大ブラッグピークを作り、Range shifter (RS) を使って最大飛程を調整する。最後に、Lateral 方向の照射野形状を

決める患者コリメータとBolus と呼ばれる飛程補償器で線量分布を照射体積の深部境界に合致させる。これらの照射野形成機器設定や器具は患者の照射条件毎に異なり、これらによる散乱等が線量分布に影響して患者線量校正因子が変化する。この患者に照射するときのビームラインの設定を**患者条件** (図1右図) と呼ぶ。

線量測定に使う指頭型電離箱と透過型電離箱は空気の温度と圧力で値が変化するため、**標準条件** (190 MeV, SOBP幅80 mm, レンジシフトなし, 185 mm<sup>2</sup>の開口を持つコリメータ, bolusなしでポリエチレン135 mm厚の場所で線量を測定する) (図1左図) における標準線量校正因子 ( $CALF_{ref}$ ) を患者測定時に同時に計測し、 $CF = CALF_{pat} / CALF_{ref}$  として管理する。そして照射日ごとに計測する  $CALF_{ref, daily}$  を使って温度・気圧条件を補正した照射日毎の患者線量校正因子を  $CALF_{pat, daily} = CF \times CALF_{ref, daily}$  にて算出して用いる。このCFを補正因子という。このCFを  $CF = CF_1 \times CF_2$  と2つの因子の掛け算で表す。  $CF_1$  はビームエネルギー, SOBP

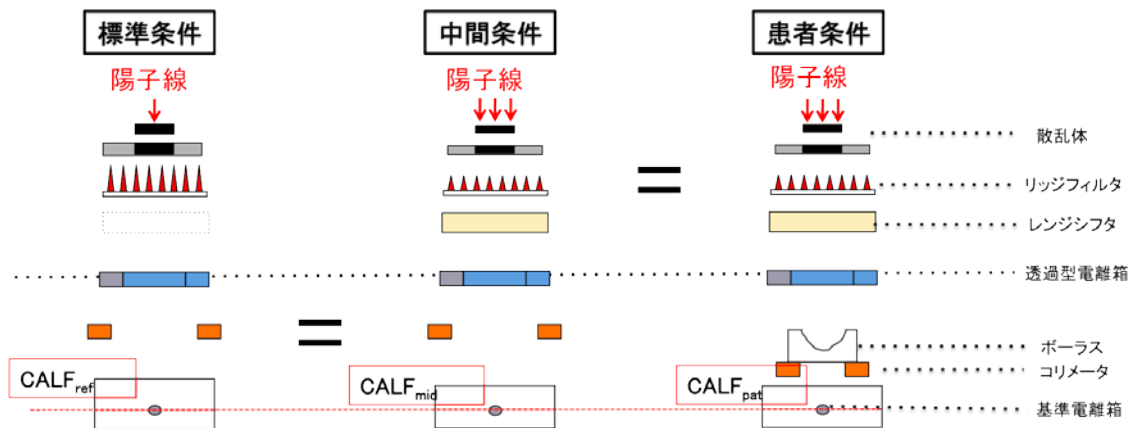


図1. 左側：標準条件， 中間：中間条件， 右側：患者条件のセットアップ

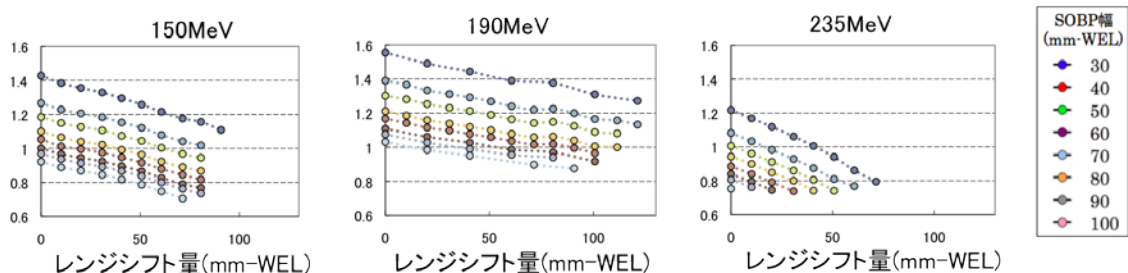


図2. 各エネルギーでの  $CF_1$  のレンジシフト量依存性

幅、レンジシフト量だけに関連する因子である。CF<sub>1</sub>は、この3つの量以外の設定が標準条件と同じ中間条件（図1中図）と呼ばれる照射条件で測った線量校正因子CALF<sub>middle</sub>とCALF<sub>ref</sub>の比で定義され、全ての組み合わせ（レンジシフト量は10 mm毎にサンプリング）を測定で求めた。その結果を図2に示す。CF<sub>2</sub>は、患者条件と患者条件と同じエネルギー、SOBP幅、レンジシフト量を持つ中間条件との線量校正因子CALF<sub>pat</sub>とCALF<sub>middle</sub>の比で定義され、患者固有のボラス、患者コリメータに影響される。これは、簡易モンテカルロ法で計算される。簡易モンテカルロ法は陽子の散乱を個別に計算できるので精度の高い計算法である。一方、照射野が小さくなるとコリメータの表面散乱の影響により計算精度が若干低下する現象が見られた。我々は、これをいくつかの口径の正方形コリメータを使って照射野効果を測定し、それをもとにClarkson積分の手法を使って、その効果を補正し、その補正因子をCF<sub>3</sub>と定義した（図3を参照）。すなわち、CF=CF<sub>1</sub>×CF<sub>2</sub>×CF<sub>3</sub>と再定義して用いた。こうすることで計算の精度が向上した。

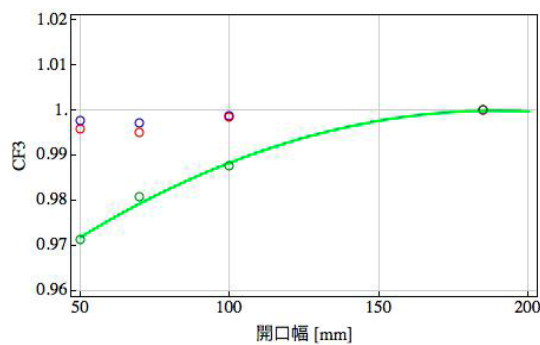


図 3. 開口幅補正（青の○：150 MeV，赤の○：190 MeV，緑の○：235 MeV，全て測定値）

#### 4. 研究成果

我々は、この計算手法の精度を確認するため、実際に陽子線治療された32門の前立腺がんの患者について測定から求めた補正因子と計算から求めた補正因子を比較した（表1を参照）。その結果、CF=CF<sub>1</sub>×CF<sub>2</sub>で計算した場合（照射野効果補正無しの場合）の計算精度は3%～5.5%の範囲で測定値より系統的に

大きかったが、照射野効果補正を取り入れたCF=CF<sub>1</sub>×CF<sub>2</sub>×CF<sub>3</sub>で計算した場合の計算精度は0.2%～1.6%となり大幅に改善し32門中20門は1%以内であった。これは実用的には十分良い精度が得られたと言える。従って、前立腺がんに対して、この手法は十分実用的な方法であることが実証された。

Ser. #	Error [%]	Error_corr [%]
1	3.7	0
2	4.8	1.1
3	4.4	0.5
4	4.7	0.8
5	4.9	1.2
6	4.8	1.1
7	5.0	1.2
8	5.3	1.4
9	3.7	0.1
10	4.3	0.7
11	4.2	0.2
12	4.9	1.0
13	5.0	1.0
14	4.8	0.8
15	4.3	0.5
16	3.9	0.2
17	4.9	1.0
18	4.0	0.2
19	4.3	0.1
20	4.6	0.5
21	4.5	0.3
22	4.8	0.5
23	3.0	-0.2
24	3.1	-0.1
25	4.8	1.0
26	5.0	1.1
27	4.7	0.7
28	5.1	1.1
29	5.5	1.6
30	5.1	1.2
31	4.6	0.7
32	5.5	1.5

表1：陽子線で治療された前立腺がん32門の照射条件における線量校正因子の補正係数と計算値の測定値に対する相対誤差。Errorは照射野効果を補正しない場合（CF=CF<sub>1</sub>×CF<sub>2</sub>）、Error\_corrは照射野効果を補正した場合（CF=CF<sub>1</sub>×CF<sub>2</sub>×CF<sub>3</sub>）を表す。

#### 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2件）

- ① Y. Hara, Y. Takada, et al., “Improvement of spread-out Bragg peak flatness for a

- carbon-ion beam by the use of a ridge filter with a ripple filter”, 査読あり, Phys. Med. Biol. 57 (2012) 1717–1731. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/57/6/1717>
- ② 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", 査読あり, Phys. Med. Biol. 55 (2010) 3545–3556. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/55/12/018>
- [学会発表] (計 19 件)
- ① 河合竜一、高田義久、他 3 名：「陽子線治療用 bi-material bolus の最適設計法の研究」、医学物理 32 巻 Sup. 3, 第 104 回日本医学物理学会学術大会報文集、pp. 313–314, (2012). (第 104 回日本医学物理学会学術大会、つくば、2012. 9. 13–15) ポスター
- ② 丹正亮平、河野良介、高田義久、他 4 名、ワブラー法における入射ビームモデルの改善と簡易モンテカルロ法を使った線量分布計算の精度検証, 医学物理 32 巻 Sup. 3, 第 104 回日本医学物理学会学術大会報文集, pp. 95–96, (2012). (第 104 回日本医学物理学会学術大会、つくば、2012. 9. 13–15)
- ③ R. Tansho, R. Kohno, Y. Takada, et al.: “Dose Calculation Model Using the Simplified Monte Carlo Method with an Initial Beam Model Adapted to a Beam-Wobbling System”, Proc. of the 55th Annual Meeting of the AAPM, held in North Carolina, in July 29-Aug. 2, Med. Phys. 39, 3817 (2012); <http://dx.doi.org/10.1118/1.4735577>.
- ④ Y. Takada, K. Nagafuchi, K. Hotta, R. Kohno, et al., Improved Calculation Accuracy of Monitor Units with Aperture Correction for Proton Radiotherapy, Abstract book of the 51-th PTCOG scientific meeting held at Coex, in Seoul, in May.17 - 19, 2012, p. 146, (2012).
- ⑤ K. Nagafuchi, Y. Takada, et al., Calculation of monitor units for proton radiotherapy, Proc. of the 6<sup>th</sup> Japan- Korea Joint Meeting on Medical Physics, held in Fukuoka, Sept.29-Oct.1, 2011, D4-2.
- ⑥ R. Tansho, R. Kohno, Y. Takada, et al., Dose calculation model using the Simplified Monte Carlo method applied to the beam-wobbling system at NCCHE, Proc. of the 6<sup>th</sup> Japan- Korea Joint Meeting on Medical Physics, held in Fukuoka, Sept.29-Oct.1, 2011, A6-1.
- ⑦ Y. Takada, T. Nihei, et al., Design method of range compensators based on dose optimization, Proc. of the 6<sup>th</sup> Japan- Korea Joint Meeting on Medical Physics, held in Fukuoka, Japan, Sept.29-Oct.1, 2011, A3-1.
- ⑧ K. Hotta, R. Kohno, Y. Takada, et al., Comparison of Dose Distributions Between Two Arrangements of a Range Compensator and of An Aperture Collimator in a Passive Scattering Method for Proton Therapy, Proc. of the 53th Annual Meeting of the AAPM, held in Vancouver, in July 31-Aug.4 (2011) Med. Phys. 38, pp.3568; doi:10.1118/3612306(1 page).
- ⑨ Y. Takada, T. Nihei, et al., A novel design method of range compensators based on dose optimization inside around the target, Abstract book of Posters of the PTCOG50 held in Pennsylvania, in May.12-14, 2011, Poster#127, (2011).
- ⑩ Y. Hara, Y. Takada, et al.: SOBP formation of a carbon-ion beam using a ridge filter with a ripple filter on the same frame, Abstract book of posters of the PTCOG50 held in Pennsylvania, in May.12-14, 2011, Poster#166, (2011).
- ⑪ R. Tansho, R. Kohno, Y. Takada, et al., Dose calculation model using the

Simplified-Monte-Carlo method based on an accurate incident-beam model for the beam-wobbling system at NCCHE, Abstract book of posters of the PTCOG50 held in Pennsylvania, in May.12-14, 2011, Poster#53, (2011).

- ⑫ 原洋介, 高田義久, 他6名, A1スラブ通過後の単一エネルギー炭素線のブラッグピーク形状のスラブ厚依存性, 医学物理31巻Sup. 2, 第101回日本医学物理学会学術大会報文集, pp. 181, (2011). (第101回日本医学物理学会学術大会, 東京, 震災により Web 上 開催 に 変更, 2011.5.9-20)
- ⑬ 永渕功輔, 高田義久, 他6名, 陽子線治療における計算による線量較正值の算出, 医学物理30巻Sup. 5, 第100回日本医学物理学会学術大会報文集, pp. 171-172, (2010). (第100回日本医学物理学会学術大会, 東京, 2010.9.23-25)
- ⑭ 原洋介, 高田義久, 他6名, Ripple filterを用いた炭素イオン線によるSOBP形成の改善, 医学物理30巻Sup. 5, 第100回日本医学物理学会学術大会報文集, pp. 193-194, (2010). (第100回日本医学物理学会学術大会, 東京, 2010.9.23-25)
- ⑮ 丹正亮平, 高田義久, 他4名, 陽子線のコリメータエッジ散乱に対する入射エネルギーの影響, 第71回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, p.01-052, (2010). (第71回応用物理学関係連合講演会, 長崎, 2010.9.14-17)
- ⑯ K. Hotta, R. Kohno, Y. Takada, et al., A retrospective analysis in head and neck cancer by using the simplified Monte Carlo algorithm, Proc. of the 52th Annual Meeting of the AAPM, held in Pennsylvania, in July 18-22, Med. Phys. **37**, (2010) pp.3293-3294;

doi:10.1118/1.3468864 (2 pages).

- ⑰ Y. Takada, K. Hotta, R. Kohno, et al., Improvement of beam-use efficiency for double-scattering method using a multiple-ring second scatterer in proton therapy, Abstract book of the PTCOG49 held in Maebashi, in May.20- 22, 2010, P5-23, p.171, (2010).
- ⑱ Y. Hara, Y. Takada, et al.: "Conceptual design of a novel ridge filter with a ripple filter for improvement of SOBP for carbon-ion therapy", Abstract book of the PTCOG49 held in Maebashi, in May.20-May.22, 2010, P5-9, p.157, (2010).
- ⑲ R. Tansho, Y. Takada, et al.: "Effect of range-compensator thickness on proton scattering in an aperture collimator", Abstract book of the PTCOG49 held in Maebashi, in May.20-May.22, 2010, P5-10, p.158, (2010).

[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・数理物質系・教授

研究者番号 : 00134205

### (2) 研究分担者

河野 良介 (KOHNO RYOSUKE)

独立行政法人国立がん研究センター・粒子線医学開発部・研究員

研究者番号 : 20392227