

重粒子線スキャンニング照射におけるイオン再結合補正法の検証

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF GAIN DROP DUE TO GENERAL ION RECOMBINATION FOR A CARBON-ION PENCIL BEAM

丹正亮平^{#, A)}, 古川卓司^{A)}, 原洋介^{A)}, 水島康太^{A)}, 早乙女直也^{A)}, 皿谷有一^{A)}, 白井敏之^{A)}, 野田耕司^{A)}
Ryohei Tansho^{#, A)}, Takuji Furukawa^{A)}, Yousuke Hara^{A)}, Kota Mizushima^{A)}, Naoya Saotome^{A)}, Yuichi Saraya^{A)},
Toshiyuki Shirai^{A)}, Koji Noda^{A)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

Abstract

Accurate dose measurement in radiotherapy is critically dependent on correction for gain drop, which is the difference of the measured current from the ideal saturation current due to general ion recombination. Although a correction method based on the Boag theory has been employed, the theory assumes that ionized charge density in an ionization chamber (IC) is spatially uniform throughout the irradiation volume. For particle pencil beam scanning, however, the charge density is not uniform, because the fluence distribution of a pencil beam is not uniform. The aim of this study was to verify the effect of the non-uniformity of ionized charge density on the gain drop due to general ion recombination.

We measured the saturation curve, namely the applied voltage versus measured current, using a large plane-parallel IC and 24-channel parallel-plate IC with concentric electrodes. To verify the effect of the non-uniform ionized charge density on the measured saturation curve, we calculated the saturation curve using a method which takes account of the non-uniform ionized charge density and compared it with the measured saturation curves.

Measurement values of the different saturation curves in the different channels of the concentric electrodes differed, and were consistent with the calculated values. The saturation curves measured by the large plane-parallel IC were also consistent with the calculation results, including the estimation error of beam size. Although the impact of the non-uniform ionized charge density on the gain drop was clinically negligible with the conventional beam intensity, it was expected that the impact would increase with higher ionized charge density.

For pencil beam scanning, the assumption of the conventional Boag theory is not valid. Furthermore, the non-uniform ionized charge density affects the prediction accuracy of gain drop when the ionized charge density is increased by a higher dose rate and/or lower beam size.

1. はじめに

粒子線を使った放射線がん治療は、腫瘍への線量集中性が高く、腫瘍周辺の正常組織への影響が低い治療法として、現在世界的に普及が進んでいる。放射線医学総合研究所(放医研)では、炭素イオン線を使った重粒子線治療を 1994 年から開始している[1]。また、重粒子線の持つ高い線量集中性を更に生かすため、3 次元スキャンニング照射装置を使った治療を 2011 年から提供している[2]。

3 次元スキャンニング照射装置は、加速器から取り出された細いペンシルビームを一对の電磁石を使ってビーム軸と垂直な面に対して走査し、更にビーム軸方向に対しては、加速エネルギーを変えることで、腫瘍に対して 3 次元的に均一な線量分布を作る。このスキャンニング照射装置においては、腫瘍への線量集中性を高める目的で、側方拡がりの小さいペンシルビームが求められている。一方で、照射時間を短縮する目的で、より高線量率なビームも同時に求められており、結果的にペンシルビームの側方サイズ縮小化と高線量率化は、重要な課題となっている。

しかし、側方サイズが小さく、高線量率なビームの使用は電離箱を使った線量測定において問題が生じる。このような高電荷密度ビームの線量測定では、電離箱内の一般イオン再結合による利得損失が避けられない。一般

イオン再結合による利得損失は、Boag の理論を使って予測可能であり[3]、電離箱で収集される電離電荷の収集効率 η は、以下の式で与えられる。

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\xi^2}{6}}$$

$$\xi = 2.01 \times 10^7 \left(\frac{d^2 \sqrt{q}}{V} \right) \quad (1)$$

d [m]は電離箱の電極間隔、 q [Cm⁻³s⁻¹]は照射体積内で生じた電離電荷の密度、 V [V]は電離箱の印加電圧である。Boag の理論は照射体積内の電離電荷密度は均一であると仮定し、式(1)においても単一の値 q を使用している。しかし、スキャンニング照射で使用する 1 本のペンシルビームの側方方向の拡がりにはガウス分布でほぼ近似され、電離箱内で生じる電離電荷分布も空間的に不均一である。Boag の理論の仮定と実際の電離電荷分布の違いは、現在使用しているビームの電荷密度領域においては、電離電荷量にたいして印加電圧が十分大きいため問題とならないが、側方ビームサイズの縮小化、高線量率化に伴い問題が顕在化すると考えられる。

本研究の目的は、将来的な側方ビームサイズの縮小

化と高線量率化に向けて、Boag の理論の仮定と実際の電離電荷分布の違いが利得損失の予測精度に与える影響を明らかにすることである。我々は、平行平板型の電離箱を使用し、電離電荷の収集効率を測定した。測定結果を式(1)で予測される結果と電離電荷の不均一性を考慮した計算結果と比較し、予測精度の違いを調べた。

2. 方法

2.1 実験方法

Figure 1 に示す同心円型の電離箱[4]を裏打ちした平行平板電離箱を使用して、印加電圧と電離電流値の関係(イオン収集効率飽和曲線)を測定した。裏面の同心円型電離箱は円環状に電極が区切られており、動径方向に 24 チャンネル分の出力が得られる。前面の平行平板電離箱の面積はペンシルビームの側方拡がりに対して十分広く、ビームによって生じる全電離電荷を収集できる。同時に同心円型電離箱によって、ペンシルビーム照射領域内の部分的な電離電荷を測定し、電荷分布の不均一性を調べられる。

測定は放医研の新治療研究棟で実施した。防水のために PMMA 製のシェルに内包された電離箱を水槽内に設置し、電離箱の中心とビーム軸が一致するようにアライメントした。140-430 MeV/u の炭素イオン線を電離箱の中心に照射し、線量率および測定深を変化させて電離電流を測定した。1 つの測定条件につき、印加電圧を 50~1000 V で変化させて、飽和曲線を得た。

2.2 計算方法

電離電荷の不均一性が一般イオン再結合による利得損失に与える影響を調べるために、電離電荷の不均一性を考慮して計算した計算値を測定値と比較した。本計算方法の概略図を figure 2 に示す。放医研の治療計画装置は、ペンシルビームの側方拡がりをもつ 3 つのガウス分布の重ね合わせでモデル化[5, 6]しているため、本計算においても、電離電荷の側方分布は 3 つのガウス分布の重ね合わせで表せるとした。これを複数の小領域(0.1 × 0.1 mm²)に分割し、小領域内における電離電荷分布は均一であると仮定した。各小領域について式(1)からイオン収集効率を計算し、以下の式(2)からペンシルビームの全照射領域におけるイオン収集効率 η_{PB} を得た。

$$\eta_{PB} = \sum_i G(x, y, z_0; x_0, y_0) \eta_i(x, y) \quad (2)$$

$G(x, y, z_0; x_0, y_0)$ は、水深 z_0 、中心座標 (x_0, y_0) のペンシルビームの側方分布、 $\eta_i(x, y)$ は i 番目の小領域におけるイオン収集効率である。本計算方法を division method と呼ぶ。

比較のため、従来の式(1)を使った計算も使用した。式(1)の使用で電離電荷密度の値 q は 2 通りの方法で見積もった。1 つは 3 つのガウス分布のうち、最も重みの大きいガウス分布の拡がり σ_1 を 3 倍した領域内で平均化した値を使う方法 (averaging method)、もう 1 つは最も電離電荷密度の高い中心の小領域の値を使う方法 (peak method) である。

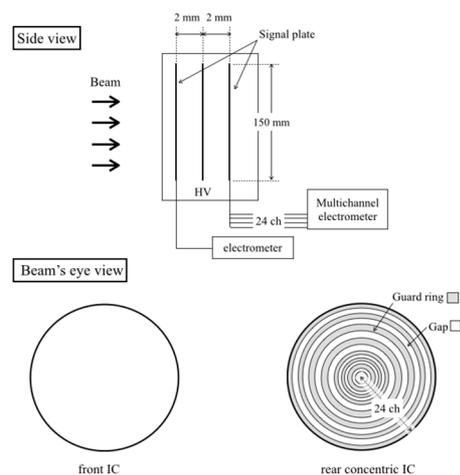


Figure 1: Geometrical design of two successive ionization chambers[4].

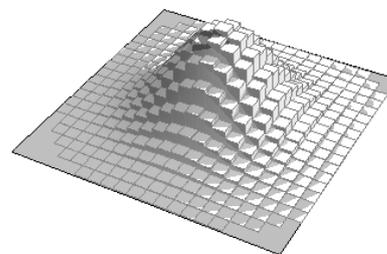


Figure 2: Schematic concept of the division calculation method.

全ての計算において電離電荷の値は、前面の平行平板電離箱で測定した飽和領域の測定値を使用した。

3. 結果

Figure 3 に同心円型電離箱の各チャンネル (ch) で測定された飽和曲線の結果を示す。Figure 3 の結果は印加電圧 1000 V のときの値を基準に規格化されている。(a) ch 1 の中心位置がビーム軸と一致するよう調整されており、チャンネル番号が大きくなるほど電離箱外側の電極であることを示している。高電荷密度のビームにおいて、Boag の理論による計算精度が低下すると考えられるので、可能な限り側方サイズが小さく、高線量率なビーム条件を設定した。Figure 3 に示す 430 MeV/u、 6.2×10^8 pps (particles per second) の条件において、averaging method で計算された q の値は 0.35 nCmm^{-3} 、peak method で計算された q の値は 1.46 nCmm^{-3} であった。

Figure 3 に示すように、各チャンネルで異なる飽和曲線の測定値が得られた。これはペンシルビームの照射によって生成された電離電荷分布が側方方向に不均一であることを示している。Division method で計算した飽和曲線の結果は、これらの測定値とよく合っており、電離電荷分

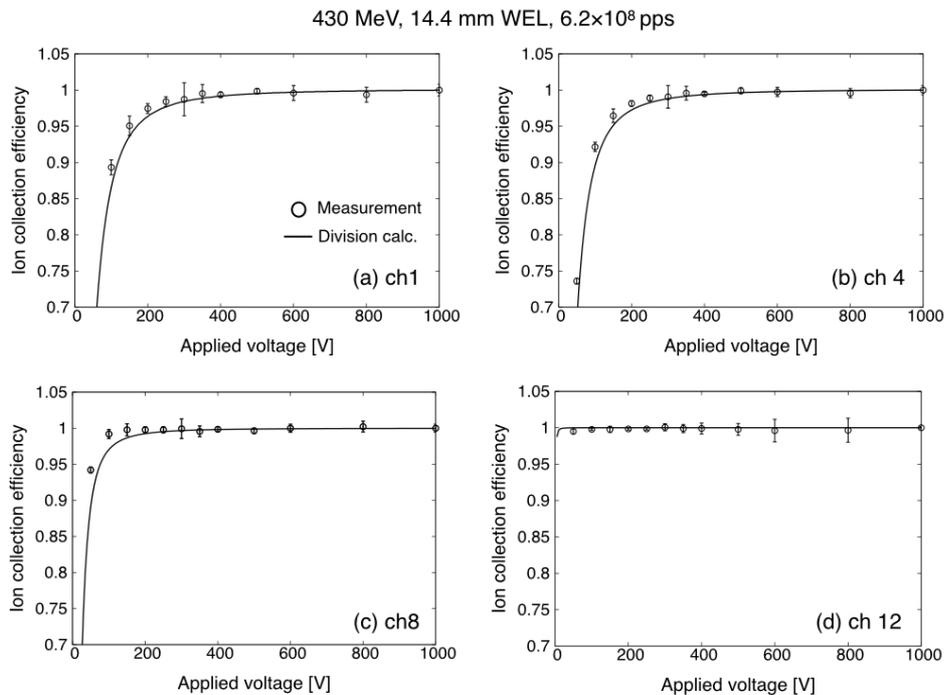


Figure 3: Comparison of saturation curves between measurements using a 24-channel parallel-plate IC and calculation results obtained by the division method. A 430 MeV/u carbon-ion with an intensity of 6.2×10^8 pps was used. Measurement depth was 14.4 mm WEL (water equivalent length), including the wall thickness of the water column and detector shell. The error bar of measurements corresponds to two times the RMS error.

布が入射ペンシルビームの分布にほぼ従っていることを示している。ビームの中心ほど電荷分布が高いため、中心側のチャンネルである figure 3 (a), (b)の結果では、印加電圧の低下に伴い、一般イオン再結合による利得損失が顕著に見られた。これらの結果から、電離電荷分布を1つの代表値に置き換える従来の方法が正確でないことは明らかである。

Figure 4 には、前面の平行平板電離箱で測定した飽和曲線の測定値と異なる3つの計算法で計算した飽和曲線の計算値の比較を示す。Figure 3 と同様に印加電圧 1000 V における値を基準に規格化している。治療でよく使用される印加電圧 400 V 以上においては、計算法に依らず測定値と計算値はよく一致しており、現在の治療条件において電離電荷分布の不均一性は、一般イオン再結合の計算精度に影響を与えないと言える。

印加電圧 400 V 以下の領域については、計算法の違いによって飽和曲線の計算値に違いが見られた。Averaging method は、ビーム中心の高電荷密度領域での大きな利得損失を計算できないため、全体の利得損失を過小評価した。逆に Peak method は、ビーム中心の電荷密度を計算に使うため、利得損失を過大評価した。電離電荷が高密度なほど、従来の averaging method による計算値と division method による計算値の差が大きくなった。例えば印加電圧 200 V において、最もビームの電荷密度が高い figure 5 (c)において両者の差は 1.8%であったが、最もビームの電荷密度が低い(d)においてその差は 0.1%だった。これらの差は、ビームの電荷密度

がさらに高くなれば、400 V 以上の印加電圧領域においても現れると考えられる。

Figure 5(a), (b)のビーム条件では、division method による飽和曲線の計算値と測定値はよく一致したが、(c), (d)においては予測精度が悪く、(c)においては過大に、(d)においては過小に利得損失を見積もった。

4. 考察

Division method はペンシルビームの照射において、一般イオン再結合による利得損失を正確に予測できる計算法であるが、figure 5 (c), (d)に示したように、測定値との差が見られる例もあった。この理由として、計算に使用する電離電荷密度 q の見積もりが不正確であることが考えられる。 q の見積もりにおいて、電離電荷の値は測定値を使用しているため、ビームの側方サイズの見積り誤差が計算結果に与える影響を調べた。

ビームの側方分布は、3つのガウス分布の重ね合わせでモデル化しているが、このうち最も重みの大きいガウス分布の拡がり σ_1 を変化させ、division method で飽和曲線を再計算し、測定値と比較した。その結果を figure 5 に示す。Figure 5 の比較は前面の平行平板電離箱における結果である。治療計画装置に登録されている測定深でのビーム拡がりは、430 MeV/u について $\sigma_1 = 1.8$ mm、140 MeV/u について $\sigma_1 = 3.8$ mmである。Figure 5 から1

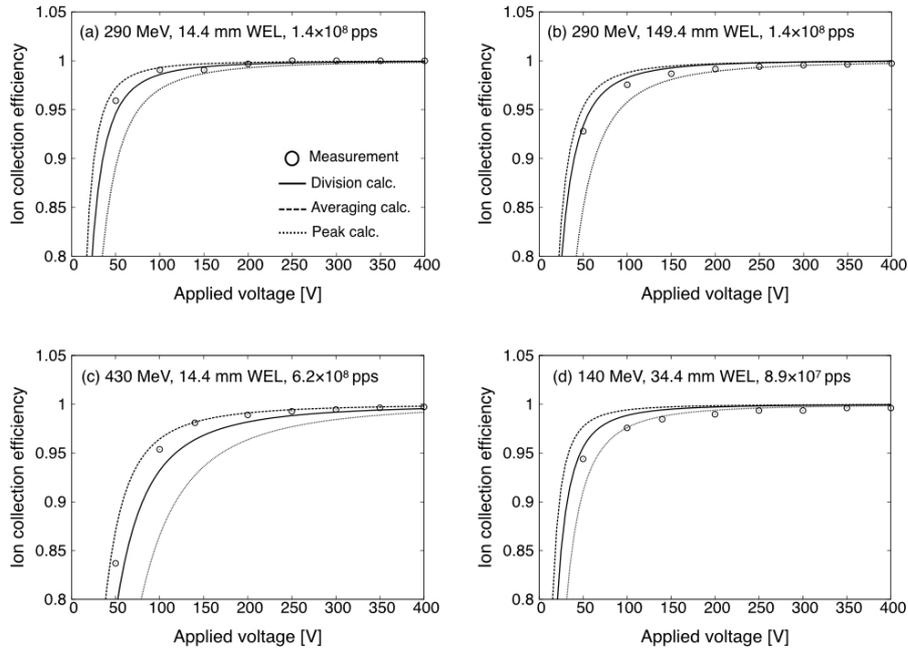


Figure 4: Comparison of saturation curves between measurements using a large plane-parallel IC and calculation results obtained by three different calculation methods.

mm 以下のわずかなビームサイズの違いが、飽和曲線の形成に影響を与えることがわかった。また、この結果から 430 MeV/u についてはビームサイズを過小評価し、140 MeV/u については、ビームサイズを過大評価していることが示唆された。

5. 結論

本研究では、電離電荷分布の不均一性が、一般イオン再結合による利得損失の予測精度に与える影響を調べた。同心円型の電離箱を使った測定から、円環状に区切られた各電極で、異なる印加電圧と電離電流の飽和曲線が得られた。Division method で計算した飽和曲線の計算値は測定値とよく一致した。ペンシルビームの

照射体積内で、電離電荷分布の不均一性が一般イオン再結合による利得損失に大きく影響を与えることがわかった。これらの結果から、電離電荷分布を 1 つの代表値に置き換える従来の計算法が不正確であることは明らかである。しかし、現在の治療で使用されるビーム強度においては、電離電荷分布の不均一性は利得損失の予測計算に影響を与えないこともわかった。一方で、印加電圧が低い領域において、averaging method と division method の計算結果に違いが見られた。これはビームの側方サイズの縮小や高線量率化によって、電荷密度が高くなると電離電荷分布の不均一性による影響が大きくなることを示唆している。この問題に対して division method は、一般イオン再結合の利得損失を正確に予測できる有用な計算法となる。

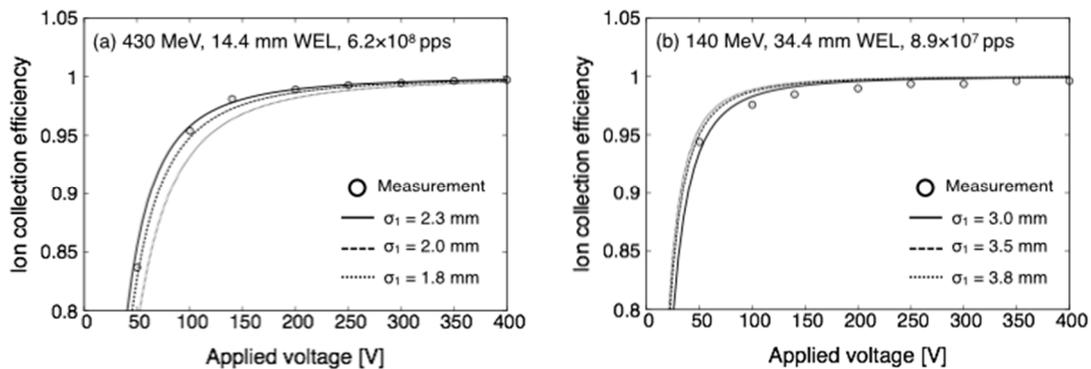


Figure 5: Comparison of saturation curves between measurements using a large plane-parallel IC and calculation results by the division method with variation of σ_1 .

参考文献

- [1] Y. Hirao, H. Ogawa, S. Yamada *et al.*, *Nucl. Phys. A* 538 (1992), pp. 541-550.
- [2] T. Furukawa, T. Inaniwa, S. Sato *et al.*, *Med. Phys.* 37 (2010), pp. 5672-5682.
- [3] J. W. Boag, "Ionization chambers", in *The Dosimetry of Ionizing Radiation*, edited by K. R. Kase, B. E. Bjärngard and F. H. Attix (Academic, New York, NY, 1987), Vol. 2, pp. 169-243.
- [4] Y. Hara, T. Furukawa, T. Inaniwa *et al.*, *Med. Phys.* 41 (2014), 021706 (8pp.).
- [5] Y. Kusano, T. Kanai, Y. Kase *et al.*, *Med. Phys.* 34 (2007), 193-198.
- [6] T. Inaniwa, T. Furukawa, A. Nagano *et al.*, *Med. Phys.* 36 (2009), 2889-2897.