

駒澤大学大学院学位審査論文

博士論文

高エネルギー電子線の水吸収線量計測における
平行平板形電離箱の測定実効点に関する研究

安居 虹希

医療健康科学研究科 診療放射線学専攻 博士後期課程

611251

要 旨

現在、放射線治療における線量計測では電離箱線量計が広く用いられている。放射線治療による腫瘍の局所制御率や有害事象の発生率は投与線量に依存する。そのため放射線治療において線量計測による不確かさを低減することは、投与線量の不確かさ低減につながり、治療効果の向上に寄与する。高エネルギー電子線に対する線量計測では一般に平行平板形電離箱が使用され、多くの線量計測プロトコルでこの電離箱タイプの測定実効点 (Effective point of measurement; EPOM) は電離空洞内前面の中心と定義されている。その一方で、これまでの研究から EPOM の位置は電離空洞内前面中心に存在しないことが明らかになった。これらは近年の技術の進歩による Monte Carlo (MC) 計算により明かされたものであり、実験的に検証された数は少ない。MC 計算ではシミュレーションパラメータの設定値が計算結果に影響を及ぼすことにくわえ、実際に使用する電離箱のばらつきを考慮することができないなどの不確かな要素が存在する。このようなことから EPOM は MC 計算のみならず、実験的に検証することが求められる。

本研究では電子線線量計測で使用される 3 種類の平行平板形電離箱 (NACP-02, Roos, Advanced Markus) の EPOM を実験的に決定することを目的とした。また電離箱間での EPOM のばらつきを評価し、各電離箱タイプで固有の値が存在するかどうかを決定した。

EPOM を決定するためには、リファレンス検出器と対象となる電離箱で取得した深部量百分率 (Percentage depth dose; PDD) が必要となる。そこで、初めに MC 計算を用いてリファレンス検出器として採用した microDiamond 検出器のエネルギー依存性について検証した。次に、電離箱計測に関わる因子のうち、極性効果補正係数 k_{pol} およびイオン再結合補正係数 k_s の深さ依存に

ついて明らかにした。そして EPOM を決定するために、PDD を実際に取得し比較することで、EPOM のエネルギー依存性および同じ電離箱タイプ間でのばらつきについて調査した。さらに、NACP-02 は入射窓の不確かさが報告されているため、MC 計算を用いて入射窓を変化させた NACP-02 の EPOM について検討を行った。

microDiamond 検出器は、高エネルギー電子線に対してエネルギー依存性を持たないことが明らかになった。加えて薄い有感体積を持つ検出器構造であることから、線量勾配が大きく、水中の深さでエネルギーの変化する電子線に対して microDiamond 検出器は理想的な検出器であることを確認した。

電離箱線量計測に必要な k_{pol} および k_s には、深さ変化があることを明らかにした。両補正係数の深さ変化は、 k_{pol} がエネルギー変化に起因し、 k_s はパルス当たりの線量の変化に起因するものであった。各電離箱で決定した両補正係数は、深さ変化のばらつきが小さな結果であったことから、同一電離箱タイプであれば単一値や単一の近似式を全てのシリアルナンバーに対して使用することは可能であることが明らかになった。

実験的に決定した EPOM のほとんどが空洞内に位置する結果となった。また EPOM にはエネルギー依存性があり、エネルギーの増加とともに EPOM はより空洞中心へとシフトすることが明らかとなった。各電離箱タイプの平均シフト値は NACP-02、Roos および Advanced Markus のそれぞれで 0.104 ± 0.004 , 0.040 ± 0.010 , 0.012 ± 0.004 cm であった。同一電離箱タイプで EPOM を比較すると、ばらつきは確認されず電離箱タイプに応じた固有の EPOM を使用することも可能であった。この EPOM を使用することで電子線線量計測の不確かさはより低減できる

ことが示唆された。

入射窓に不確かさが報告されている NACP-02 は、これまで MC 計算で報告されてきた EPOM の位置とは異なり、より空洞側へ位置することが明らかになった。NACP-02 の入射窓を変化させて MC 計算を実施したところ、実験的に決定した EPOM と同じ位置となる入射窓は、仕様書通りに再現したモデルとは異なるものであった。この結果に伴い、本研究で使用した NACP-02 の入射窓は仕様書とは異なる可能性が示唆された。

本研究では平行平板形電離箱を用いた高エネルギー電子線線量計測のために採用すべき EPOM を明らかにした。電離箱タイプによっては入射窓に不確かさを持つものも存在するため、MC 計算のみならず本研究のように実験的に決定することが望まれる。本研究結果に基づいた線量計測を実施することで、現状の線量計測プロトコルよりもさらに線量計測による不確かさを低減することが可能となる。

目次

第1章 序論	1
1.1 放射線治療における投与線量の不確かさ	1
1.2 放射線治療における線量計測	1
1.2.1 電離箱線量計を用いた線量計測	1
1.2.2 絶対線量計測と相対線量計測.....	3
1.2.3 電離箱による水吸収線量計測と擾乱補正係数	4
1.3 電離箱を使用した水吸収線量計測における測定点	5
1.3.1 絶対線量計測と相対線量計測における電離箱基準点の違い	5
1.3.2 平行平板形電離箱の EPOM に対する議論	6
1.3.3 NACP-02 電離箱の入射窓の不確かさ	8
1.4 半導体検出器による相対線量計測	8
1.5 研究目的と意義	9
1.6 本論文の構成	10
第2章 microDiamond 検出器のエネルギー依存性の検証	12
2.1 目的	12
2.2 方法	12
2.2.1 egs_chamber による microDiamond 検出器の作成	12
2.2.2 microDiamond 検出器のエネルギー依存性の確認	14
2.3 結果	14
2.3.1 egs_chamber による microDiamond 検出器の作成	14
2.3.2 microDiamond 検出器のエネルギー依存性の確認	15
2.4 考察	15
2.5 結論	17
第3章 極性効果とイオン再結合効果の深さ依存の検討	18
3.1 目的	18
3.2 方法	19
3.2.1 極性効果補正係数の決定	19
3.2.2 イオン再結合補正係数の決定.....	20
3.3 結果	21
3.3.1 極性効果補正係数の決定	21
3.3.2 イオン再結合補正係数の決定.....	21
3.4 考察	22
3.4.1 極性効果補正係数の決定	22

3.4.2	イオン再結合補正係数の決定.....	27
3.5	結論	31
第4章	平行平板形電離箱の測定実効点の決定	32
4.1	目的	32
4.2	方法	32
4.2.1	EPOM の決定方法.....	32
4.2.2	PDD の取得.....	34
4.3	結果	35
4.3.1	EPOM のエネルギー依存性.....	35
4.3.2	EPOM のばらつき.....	35
4.4	考察	36
4.5	結論	40
第5章	NACP-02 電離箱の入射窓の不確かさの検討.....	41
5.1	目的	41
5.2	方法	41
5.2.1	ビームモデリング	41
5.2.2	NACP-02 の電離箱モデリングおよび EPOM の決定	42
5.3	結果	44
5.3.1	ビームモデリング	44
5.3.2	NACP-02 仮想電離箱モデルの違いによる EPOM の相違	45
5.4	考察	45
5.5	結論	48
第6章	総括.....	50
参考文献	52
図	58
表	78
謝辞	84

第1章 序論

1.1 放射線治療における投与線量の不確かさ

現在、放射線は理工学や産業分野など、様々な領域で利用されている。これは医療分野においても同様であり、画像診断や放射線治療に使用される欠かせない技術へと発展した。放射線治療はがんを死滅させ治癒することを目的としており、近年では様々な疾患が放射線治療の対象となっている。

放射線治療を実施するにあたり各疾患に必要な投与線量は異なるが、投与線量が7～10%変化すると腫瘍の局所制御率に影響を与える可能性がある。このため、投与線量の不確かさについて国際放射線単位測定委員会 (International Commission on Radiation Units & Measurements; ICRU) の Report 24¹⁾ や、米国医学物理学会 (The American Association of Physicists in Medicine; AAPM) の Report 13²⁾ では5%以内に抑える必要があると勧告している。放射線治療では処方線量を決定し照射するまでに、線量計測や線量計算、患者セットアップなど様々なプロセスを経る。この各プロセスにおいて不確かさが存在するものの、これらはあらかじめ物理的に推定可能である。したがって、患者の体内にある腫瘍に対して実際に投与される線量を推定するには、各プロセスで生じる不確かさを正しく評価し、また可能な限り低減する必要がある。

1.2 放射線治療における線量計測

1.2.1 電離箱線量計を用いた線量計測

高エネルギー放射線における線量計測では優れた安定性、吸収線量に対する線量直線性、方向

依存性などの観点から、主に電離箱線量計（以降、電離箱と省略する）が使用される。電離箱の種類は様々であり、主に X 線に対しては円筒形電離箱が使用され、電子線に対しては平行平板形電離箱が使用される（図 1.1）。なかでも低エネルギー電子線（10 MeV 以下）の標準計測では平行平板形電離箱の使用が必須とされている。平行平板形電離箱は入射窓からの荷電粒子による電離電荷のみを収集し、側壁からの荷電粒子の寄与は十分に大きな保護電極を持っていれば無視できる。つまり、側方から空洞への線量寄与はないものと考えることができる。また空洞の高さは非常に小さい設計であることから、深さ分解能に優れており、線量勾配が急峻な電子線に対して有効とされている。そのため日本の線量計測プロトコル³⁾のみならず、世界で使用されるプロトコル⁴⁻⁶⁾においても、電子線計測では平行平板形電離箱の使用が推奨または必須とされる。

水吸収線量の決定には電離箱が一般に用いられており、日本国内では外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法（標準計測法 12）³⁾に記載されているフォーマリズムに基づいている。このフォーマリズムでは線質 Q における水吸収線量 $D_{w,Q}$ を、電離箱で取得した計測値 M_Q から以下のように算出することができる。

$$D_{w,Q} = M_Q \times N_{D,w,Q_0} \times k_{Q,Q_0} \quad (1)$$

ここで N_{D,w,Q_0} は水吸収線量校正定数であり、個々の電離箱に与えられる。 k_{Q,Q_0} は線質変換係数と呼ばれ、基準線質とユーザー線質の間で電離箱応答の違いを補正するものであり電離箱タイプごとに提供される。計測値 M_Q は線量計の表示値 \overline{M}_Q^{raw} を使用し、各補正係数を乗じることで算出する。

$$M_Q = \overline{M_Q^{raw}} \times k_{TP} \times k_{elec} \times k_{pol} \times k_S \quad (2)$$

これらの補正係数は電離箱内で生じる影響を補正するものである。電離箱空洞内の空気の質量が温度と気圧により変化することを補正する温度気圧補正係数 (k_{TP})、電位計の表示値 (rdg) を電荷へと変換するための電位計校正定数 (k_{elec})、印加電圧の極性の違いによる読み取り値の変化を補正する極性効果補正係数 (k_{pol})、そして空洞内で発生した正負のイオンが再結合をおこすことによる収集効率の低下を補正するイオン再結合補正係数 (k_S) の4つを使用する。電離箱を用いた線量決定は上記のステップを踏む必要があり、これらの補正係数を正確に求めることは、投与線量の不確かさの低減につながる。

1.2.2 絶対線量計測と相対線量計測

高エネルギー放射線に対する線量計測は、「絶対線量計測」と「相対線量計測」の2つに分けることができる。絶対線量計測は治療用加速器からの出力を計測・校正する作業であり、我々が普段定義している投与線量に大きな影響を及ぼす。1.2.1 で示した式 (1) および (2) に従い、校正深 (d_c) で水吸収線量の決定を行う。これにより、加速器から照射されるモニタ設定値あたりの線量 (Dose monitor unit; DMU) を決定する。一方で、相対線量計測は加速器から放出されるビームの分布を評価するものであり、深部量百分率 (Percentage depth dose; PDD) や軸外線量比 (Off-axis ratio; OAR) といった、ビーム軸に対し平行または垂直なビームデータ計測である。

これらのビームデータは、放射線治療計画装置（Treatment planning system; TPS）に登録する必要がある。TPS では患者の体内線量をシミュレーションして、最適な治療計画を作成するため、TPS に登録するビームデータは正確である必要がある。放射線治療を実施するためには TPS の使用が不可欠であり、この TPS に登録するデータの不確かさが計画した投与線量や線量分布に直接不確かさとして寄与してしまう。したがって、TPS に登録するビームデータは不確かさを十分に低くする必要がある。

1.2.3 電離箱による水吸収線量計測と擾乱補正係数

電離箱を用いた水吸収線量計測では、電離箱を水ファントム内に配置することで放射線場に乱れが生じるため、擾乱補正係数により計測値を補正する必要がある。擾乱補正係数は 4 つに分類され、電離箱壁および防浸材質の水不等価性に対する壁補正係数 (P_{wall})、水と空洞の相違による電子フルエンスの大きさの変化に対する空洞補正係数 (P_{cav})、同様に電子フルエンスの深さによる変化に対する変位補正係数 (P_{dis})、そして円筒形電離箱では中心電極と空気の不等価性に対する中心電極補正係数 (P_{cel}) がある。平行平板形電離箱では中心電極が存在しないため P_{wall} 、 P_{cav} および P_{dis} を考慮する必要がある。これら各擾乱補正係数は $k_{\text{Q,Q}_0}$ に含まれており、絶対線量計測ではこれら 4 つの擾乱補正係数が加味されている。それに対して相対線量計測では、これら擾乱補正係数が計測結果に及ぼす影響は無視できる程度とされ、補正されない。このことは X 線計測のみならず電子線計測においても同様であり、平行平板形電離箱について P_{wall} および P_{cav} の両者は深さによらず 1 としている。そのため、平行平板形電離箱を用いた電子線計測では、深部電離量

百分率 (Percentage depth ionization; PDI) に対し、空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比

$((\bar{L}/\rho)_{w,air})$ の補正のみで PDD のデータが取得可能となる。

従来、相対線量計測では擾乱補正係数を無視していたが、近年の先行研究から上述した擾乱補正係数はエネルギー依存を持つことが明らかになった⁷⁻¹⁰⁾。 P_{wall} について、Araki⁷⁾ は NACP-02、Roos を対象とし、4 MeV における線量半価深 (R_{50}) での値は想定されていた 1 よりもそれぞれ 10%、8% ほど高いことを明らかにした。 Buckley ら⁸⁾ も NACP-02 について、 P_{wall} は基準深 (d_{ref}) から R_{50} へと深くなるにつれて、6 MeV で 6% ほど変化することを示した。また、電子フルエンスの補正について Araki⁷⁾ や Wang ら⁹⁾ は置換補正係数 ($P_{repl} = P_{dis} \times P_{cav}$) として評価しており、 P_{repl} も深さとともに大きく変化することを示した。このように擾乱補正係数の変化については様々な論文⁷⁻¹⁰⁾ で報告されている。このことから、これまで擾乱補正係数を補正せずに相対線量計測を行っていたが、これは正しい値が取得できていないとは言えず、不確かさの大きな要因である可能性がある。したがって、擾乱補正係数の深さ変化を補正した線量計測の実施、あるいは補正をしなくてもよい測定点を明らかにすることが求められる。

1.3 電離箱を使用した水吸収線量計測における測定点

1.3.1 絶対線量計測と相対線量計測における電離箱基準点の違い

一般に電離箱を使用する際、絶対線量計測と相対線量計測では使用する電離箱基準点が異なる。

円筒形電離箱を用いた絶対線量計測では、X 線に対しては幾何学的中心に、電子線に対しては幾何学的中心から $0.5r_{cav}$ (r_{cav} : 空洞半径) 線源側にシフトした位置を基準点とする。また相対線量

計測では、X線に対しては幾何学的中心から $0.6r_{\text{cav}}$ 線源側、電子線に対しては $0.5r_{\text{cav}}$ 線源側へとシフトさせた位置を基準点とする。この相対線量計測で使用する電離箱基準点を測定実効点（実効中心と同義、Effective point of measurement; EPOM）と呼ぶ。このように円筒形電離箱では測定する放射線とビームデータの種類に応じて、基準点を变化させて計測する必要がある。これに対し、平行平板形電離箱を用いた電子線線量計測では絶対線量計測および相対線量計測の両方で電離空洞内前面の中心を基準点として定義する。これらを図 1.2 にまとめた。EPOM を測定点に採用すると、擾乱補正係数のうち P_{dis} を深さによらず単一とすることができるため、相対線量計測に有用となる。なお、平行平板形電離箱を用いた X 線計測は、 P_{wall} の決定法に一貫性がなく推奨されていないため、平行平板形電離箱については電子線計測のみで言及される。

1.3.2 平行平板形電離箱の EPOM に対する議論

この EPOM へのシフトに対しては様々な議論がある。円筒形電離箱について、国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency; IAEA) の発刊している TRS-277¹¹⁾ では、当初、高エネルギー X 線に対して $0.75r_{\text{cav}}$ 、 ^{60}Co に対して $0.5r_{\text{cav}}$ としていた。その後、実験値との相違が報告されたことで $0.6r_{\text{cav}}$ へと変更され、現在もこのシフトが採用されている。その一方で、平行平板形電離箱は、1.2.1 で述べた構造の特性を持ち、また擾乱が小さく P_{wall} および P_{cav} を 1 とみなしていることから、かねてより EPOM は電離空洞内前面の中心と同じ位置であるとみなされてきた。

上述のように、平行平板形電離箱は電離箱構造の特性から EPOM は電離空洞内前面の中心と同じ位置であるとされてきたが、近年のコンピューター技術の発展によりこの EPOM の位置に

ついて改めて議論されている¹²⁻¹⁶⁾。特に Monte Carlo (MC) 計算の普及により、これまでとは異なる位置に EPOM は存在することが明らかになった¹²⁻¹⁶⁾。これは単一と考えられていた P_{wall} および P_{cav} に深さ変化が確認されたことに由来する^{7,8)}。EPOM の使用により P_{dis} を単一と考えることができたが、電離空洞内前面の中心では他の擾乱係数の深さ依存を助長するおそれがあるため、相対線量計測では P_{dis} のみを考慮した現行の EPOM ではなく、 P_{wall} 、 P_{cav} および P_{dis} の全ての影響を最小にできる測定点の使用が望ましいと考えられる。現在も多くの平行平板形電離箱が使用されているが、なかでも NACP-02、Roos および Advanced Markus は多くの施設が使用している。そのため、これら 3 つの電離箱の EPOM を明らかにすることは、各施設のビームデータ取得に対する不確かさ低減につながると予想される。

平行平板形電離箱の EPOM について取り扱う先行研究の多くは MC 計算に基づいており、実験による検証は非常に限られている^{17,18)}。MC 計算は線量評価の正確な計算のために広く用いられている手法である一方で、シミュレーションにも不確かな要素は存在する。そのうちの 1 つとして電離箱モデルの再現性がある。MC 計算では理想化された形状を使用するため、電離箱の製造における個体差を考慮することができない。そのため MC 計算で決定した値を実際の線量計測に使用可能か不明であり、決定された結果は実験値との比較により検証する必要がある。これまで報告されてきた EPOM に関する先行研究を表 1.1 にまとめた。Roos については実験により EPOM を決定した報告が比較的多いものの、NACP-02 については 1 つのみであり、Advanced Markus はこれまで実験的に決定されていない。そのため NACP-02 および Advanced Markus については、特に実験的検証によって MC 計算の結果の妥当性評価を行う必要がある。

1.3.3 NACP-02 電離箱の入射窓の不確かさ

広く普及されている平行平板形電離箱のなかの一つである NACP-02 だが、この電離箱は入射窓の不確かさをもつことが報告されている¹⁹⁾。NACP-02 の仕様書によると、入射窓は 0.05 cm 厚の Graphite 層に 0.01 cm 厚の Mylar 箔を合わせた、計 0.06 cm 厚であるとされている。その一方で、Chin ら¹⁹⁾は使用できなくなった NACP-02 を解体し、入射窓の厚さおよび密度を実際に測定したところ、Mylar 箔は仕様よりも 70%厚いことを明らかにした。さらに Graphite の密度は 1.75 g/cm³ではなく、2.25 g/cm³であったことも同様に報告している。このことから、Chin らは入射窓の質量厚が仕様の 104 mg/cm²ではなく 35%増の 140 mg/cm²であるとした。つまり NACP-02 に関しては、擾乱補正係数やこれまで報告されている EPOM の位置は正しいものではない可能性がある。

この入射窓の不確かさの検証に MC 計算を使用することは困難である。MC 計算により入射窓の厚さや密度を変更した電離箱のモデリングは可能であるが、実際に臨床使用する電離箱が MC 計算で再現したモデルと同等であるかは不明である。また、MC 計算に使用する線源データと、実際に加速器から出力されるビームデータは同一とはならない。そのため入射窓に不確かさを持つような電離箱を使用する場合、より一層実験的に検証する必要がある。

1.4 半導体検出器による相対線量計測

電離箱による線量計測が一般的に行われている一方で、近年は半導体検出器による相対線量計測も行われており、簡便で正確な線量計測ができることが知られている。半導体検出器の有感体

積部分に使用する素子の密度は、電離箱の有感体積である空気よりも高く、入射した放射線が発生させる電荷は電離箱よりも多く信号量が増えるため、有感体積を小さくすることが可能となる。またイオン対を作るために必要なエネルギー（W 値）は、空気と比較すると、半導体検出器のほうが小さい。そのため電離箱よりも感度が高いため、有感体積を小さくしても電離箱と同等以上の線量計測を行うことができる。このような特徴から半導体検出器は相対線量計測の主流となつつある。

半導体検出器のなかでも、microDiamond 検出器は特に電子線線量計測に有用である。microDiamond 検出器の有感体積は 0.004 mm^3 と高分解能である。さらにダイヤモンド素子の原子番号 ($Z=6$) が水の実効原子番号 ($Z_{\text{eff}}=7.4$) と近い。そのため電子線の PDD を決定する際に用いる、ダイヤモンドに対する水の平均制限質量衝突阻止能比 ($(\bar{L}/\rho)_{\text{w,Dia}}$) は、エネルギーによらず一定とされる。したがって、microDiamond 検出器は、計測値そのものを PDD として扱うことができ、深さでエネルギーの変化する電子線を計測するには理想的な検出器であり、簡便にかつ高分解能な PDD の取得が可能となる。平行平板形電離箱の EPOM を実験的に検証するにあたり、基準データの取得が必要となる。基準データは水と同じ分布が取得できることが望ましいため、microDiamond 検出器は基準検出器に最も適していると考えられる。

1.5 研究目的と意義

電子線計測では平行平板形電離箱の使用が推奨されており、相対線量計測の測定位置には EPOM を用いるべきとされているが、この位置は未だ議論がなされている。従来の EPOM では

P_{dis} のみが考慮され、他の擾乱補正係数の深さ依存を考慮するためにはこれまでとは異なる測定位置の使用が求められる。

電離箱を用いた線量計測において EPOM に関する報告は主に MC 計算が主流であり、実験により EPOM の位置を検証した報告は少ない。また入射窓の不確かさをもつ電離箱タイプも存在し、MC 計算では検証することができないため、より一層実験的に EPOM を検証することが求められる。

一方で microDiamond 検出器のように高分解能な半導体検出器も近年使用されているが、多くの施設が半導体検出器を保有しているわけではない。我が国の線量プロトコル³⁾においても電離箱による線量計測を主としているため、電離箱を使用した線量計測で十分に不確かさを低減できる手法として、各擾乱係数の深さ依存を最小にできる新たな EPOM を決定することが求められる。

そこで本研究では、一般に電子線線量計測で使用される平行平板形電離箱を対象とし、正確な相対線量計測を行うための EPOM について、実験的に検証することで明らかにすることを目的とする。また、電離箱間での EPOM のばらつきを評価し、各電離箱タイプで固有の値が存在するかどうかを決定する。

1.6 本論文の構成

本研究では EPOM を実験的に決定するために PDD を使用する。EPOM シフトの原因は擾乱補正係数の深さ依存に由来するため、線量分布の深さ変化を示す PDD を用いる必要がある。そ

のために本論文は全 6 章に分け、各章で EPOM 決定に必要な検討事項を扱う。

2 章では平行平板形電離箱の EPOM を決定するために基準とする microDiamond 検出器のエネルギー依存性について検証を行う。この検証は水で取得した結果と比較する必要があるため、実験的に検証することができない。そこで MC 計算を使用して microDiamond 検出器の性能を確認する。

3 章では電離箱を用いた水吸収線量計測で必要となる補正係数について検討を行う。1.2.1 で述べたように、電離箱による線量計測では 4 つの係数が必要となる。そのなかでも、 k_{pol} と k_{S} の値は入射する水ファントムの深さに依存することが明らかになっている。電離箱の正確な EPOM を決定するためには正しい PDD を取得する必要がある、そのためには k_{pol} および k_{S} の深さ変化を正しく補正する必要があると考えられる。そこで各電離箱でこれらの補正係数の深さ依存について検討した。

4 章では実際に各電離箱で取得した PDD をもとに、電離箱タイプごとに EPOM を決定する。これまでの先行研究では EPOM のばらつきは明らかにされておらず、また EPOM のエネルギー依存についても不明確なままとなっている。この 2 点について検討および評価を行う。

5 章では入射窓に不確かさをもつ NACP-02 の EPOM について評価を行う。これまで MC 計算により決定された EPOM の位置の妥当性について検討する。

6 章では電子線計測における平行平板形電離箱の EPOM についての総括を述べる。

第 2 章 microDiamond 検出器のエネルギー依存性の検証

2.1 目的

電離箱の EPOM を実験的に決定するためには、基準となる PDD を計測するリファレンス検出器がエネルギー依存を持たないことが望ましい。特に本研究が対象としている高エネルギー電子線は荷電粒子であり、水中では連続的にエネルギーを失い減速する。つまり、深さによってエネルギーが異なる。したがって、リファレンス検出器のエネルギー依存性は水と同程度であることが要求される。そこで本章では、初めにリファレンス検出器として採用した microDiamond 検出器を MC シミュレーションコードで作成する。そして実際に計測で使用する microDiamond 検出器と同様の挙動を示すかどうか、作成した検出器モデルの再現性についての確認を行う。MC 計算の再現性が良好であることを確認したのち、高エネルギー電子線に対して microDiamond 検出器のエネルギー依存性を評価することを目的とする。

2.2 方法

2.2.1 egs_chamber による microDiamond 検出器の作成

初めに汎用 MC コード EGSnrc²⁰⁾ のユーザーコードである egs_chamber²¹⁾ により、microDiamond 検出器を設計図に基づいて作成した。図 2.1 (a) は作成した microDiamond 検出器の内部構造の断面であり、(b) は検出器内にある Diamond 部分であり濃赤色で示した部分を有感体積として設定している。作成した検出器を使用し MC 計算により決定した出力係数 (Output factor; OPF) と、駒澤大学に設置されている放射線治療装置 TrueBeam (Varian medical systems

社)で実験的に取得した OPF を比較することで、仮想的に作成した検出器の再現性を確認した。

MC 計算で OPF_{MC} を決定するために、 $40 \times 40 \times 30 \text{ cm}^3$ の水ファントムを再現し、線源検出器間距離 (Source to detector distance; SDD) を 100 cm とした。再現した microDiamond 検出器をビーム中心軸上の深さ 10 cm に、ビーム軸と検出器の長軸が平行となるように配置し、点線量の計算を行った。図 2.1 (c) にビームと検出器の配置関係を示している。このジオメトリを使用し、phase space file のみを変更することで OPF_{MC} を算出した。phase space file は TrueBeam のヘッドモデルから作成されたデータであり、Varian 社製の定位放射線治療 (Stereotactic radiosurgery; SRS) 用コーンを模したものである。基準とする照射野は SRS コーンを使用しない $5 \times 5 \text{ cm}^2$ の正方形照射野とし、17.5、15.0、12.5、10.0、7.5、5.0、4.0 mm ϕ の SRS コーンで取得した OPF_{MC} を決定した。このときの Jaw サイズは $5 \times 5 \text{ cm}^2$ で固定している。エネルギーは 6 MV の Flattening Filter (FF) ビームとした。表 2.1 は検出器の再現性確認のためのシミュレーションで採用した計算パラメータである。

実験的に決定する OPF_{meas} は駒澤大学で過去に取得されたデータを採用した。このデータは Blue Phantom² (IBA Dosimetry 社) を使用し取得されたデータである。SRS コーンを使用するような小さな照射野では、モニタ電離箱の設置が不可能となる。そのため OPF_{meas} は各計測を 5 回実施し、さらに日にちを変えて 3 度計測された値の平均であり、再現性が担保されている。この計測におけるジオメトリは MC 計算で再現したもの (図 2.1 (c)) と同じ設定である。

2.2.2 microDiamond 検出器のエネルギー依存性の確認

仮想的に作成した microDiamond 検出器と water voxel を用いて、MC 計算により電子線の PDD を取得し、両者を比較することで microDiamond 検出器のエネルギー依存性の検証を行った。

40×40×30 cm³の水ファントムを再現し、線源表面間距離 (Source to surface distance; SSD) を 100 cm、ファントム表面における照射野を 20×20 cm²とした。比較対象とする water voxel は半径 0.5 cm、厚さ 0.02 cm の円柱形状とした。電子線は深さによってエネルギーが変化するが、エネルギー依存性を広範囲に検証するには TrueBeam に搭載されている最大エネルギーで行うことが最も合理的である。そこで本検証で使用した phase space file のエネルギーは 22 MeV とし、一次電子線が届く深さと考えられている実用飛程 (R_p) までをエネルギー依存の評価範囲とした。

そのため PDD の計算範囲は水表面の 0.1 cm から R_p (22 MeV ではおよそ 11 cm) よりも深い位置である 11.6 cm までとし、0.5 cm 間隔で計算を実施した。表 2.2 はエネルギー依存を確認するためにシミュレーションで採用した計算パラメータである。

2.3 結果

2.3.1 egs_chamber による microDiamond 検出器の作成

egs_chamber により作成した microDiamond 検出器の再現性は良好である結果を示した。図 2.2 に MC 計算および実験的に決定した microDiamond 検出器の OPF を示す。また OPF_{meas} を基準としたときの OPF_{MC} の線量誤差も示している。両者の結果は良好な一致を示しており、線量誤差は十分小さいことがわかる。4.0 mm ϕ のように小さな照射野でも両者の差は -0.17% と非常に小

さく、最大誤差は 17.5 mm ϕ の 0.50%であった。また最小誤差は 7.5 mm ϕ で 0.14%であった。

2.3.2 microDiamond 検出器のエネルギー依存性の確認

高エネルギー電子線に対して microDiamond 検出器はエネルギー依存がないことを明らかにした。図 2.3 に MC 計算により取得した microDiamond 検出器と water voxel の PDD に加え、water voxel を基準としたときの microDiamond 検出器の線量誤差を示した。横軸は深さ d を線質指標 R_{50} で除した d/R_{50} の形式で表記している。ここでは線量誤差を d/R_{50} が 0.1~1.2 まで 0.1 間隔で評価した。最大線量誤差は $d/R_{50}=0.8$ のときに -0.82% であり、全ての深さで 1%以内の結果を示した。また microDiamond 検出器と water voxel の PDD から決定した R_{50} はどちらも 8.89 cm と同一の値を示し、 $d/R_{50}=1.0$ のときの線量誤差は 0.13%と小さな結果であった。

2.4 考察

OPF_{MC} と OPF_{meas} の間に大きな差は確認されず、egs_chamber で作成した microDiamond 検出器の再現性は良好であった。実際の計測により決定された OPF_{meas} と比較すると、 OPF_{MC} の値は最小サイズの 4.0 mm ϕ を除いて高くなる傾向となった。MC 計算と実際の計測に使用した加速器ではスペクトルやエネルギー分布などはわずかに異なる。計測で取得したデータについては、各サイズの SRS コーン取り変え作業のため水ファントムの下降および上昇が必要となる。この作業が伴うため必ずしも全ての照射野で SDD が一定の条件で計測できていたとはいえない。また、各照射野の phase space file は同一のヘッドモデルから作成しており、SRS コーンは Varian 社が

提供している設計図に基づいてモデリングが行われているが、駒澤大学が保有している SRS コー
ンと設計図の間でわずかな相違を持つ可能性がある。そのため、 OPF_{MC} と OPF_{meas} が完全に同一
の結果を示すとは言えない。しかしながら、両者の差は最大でも 0.50% と十分小さな差であるこ
とから、egs_chamber で作成した microDiamond 検出器の再現性は良好であると考えられる。

図 2.3 の通り、microDiamond 検出器はエネルギー依存を持たないことを確認した。本研究で
基準検出器として採用した microDiamond 検出器は、阻止能比を補正することなく PDD を取得
することができる。このことは図 2.4 に示す阻止能比のエネルギー変化からも確認することがで
き、電離箱で使用する $(\bar{L}/\rho)_{w,air}$ と比較すると、 $(\bar{L}/\rho)_{w,Dia}$ の変化は十分に小さいことがわかる。
 $(\bar{L}/\rho)_{w,Dia}$ に対してもわずかなエネルギー変化は確認できるが、microDiamond 検出器の有感体積
は厚さ 1 μm と非常に薄いことから、阻止能比の変化は無視できるほど小さくなり、結果として
補正は不要であったと考えられる。microDiamond 検出器にエネルギー依存がある場合、線量誤
差は大きく変化することが予想されたが、全ての深さで線量誤差は 1% 以内とエネルギー依存が
小さな結果を示した。Pimpinella ら²²⁾ は MC 計算によって、臨床で使用される電子線を対象とし
microDiamond 検出器の応答変動を求めた。彼らは使用した 6~18 MeV で 2% 以内の応答変動を
示しており、相対線量計測に補正係数が不要であることを示した。この結果は本研究と同等の結
果である。また、microDiamond 検出器の有感体積の薄さは、特に線量勾配が急峻な電子線には
有効な検出器となる。本研究のように、電子線計測に対して基準検出器として扱うことに理想的
な検出器であることが示唆された。

2.5 結論

本章では microDiamond 検出器のエネルギー依存性について MC 計算に基づいた検証を行った。egs_chamber で作成した microDiamond 検出器の再現性は十分であった。臨床で使用している高エネルギー電子線に対して、microDiamond 検出器はエネルギー依存のない検出器であり、その検出器構造からも高エネルギー電子線線量計測では理想の検出器であることが確認された。

第3章 極性効果とイオン再結合効果の深さ依存の検討

3.1 目的

実験的に EPOM を決定するためには、電離箱の計測値にかかわる因子を正しく評価することが求められる。MC 計算では線量を直接決定することが可能であるため、収集データに対する補正は不要となるが、実験的に決定するためには様々な補正が必要となる。線量の決定については序論で述べたように、電離箱により計測した表示値に対して4つの補正係数が必要となる。これは絶対線量計測のみならず、相対線量計測においても同様である。本研究では EPOM の決定に PDD を必要とするが、正確な PDD の取得には PDI を正しく計測する必要がある。そのためには \overline{M}_Q^{raw} に対して必要な補正を各深さで行うことが求められる。

\overline{M}_Q^{raw} に対する補正係数のうち、 k_{pol} および k_S は水ファントムの深さにより値が変化することが報告されている^{23,24)}。そのため理想的な PDD の取得にはこれらの補正が必要になると想定されるが、AAPM TG-51 プロトコル⁵⁾では、十分な保護電極幅を持つ電離箱であれば、PDI に対し k_{pol} および k_S の影響は無視できるとしている。また IAEA TRS-381²⁵⁾では、保護電極の大きさが電極間隔の1.5倍以上のものを十分に保護された電離箱としており、本研究で対象としている3つの電離箱タイプはこの要件を満たしている。その一方で、NACP-02 や Advanced Markus に対してはこの要件を満たしているにもかかわらず、保護電極の大きさが十分ではないとの報告²⁶⁻²⁸⁾もある。そのため必ずしも k_{pol} および k_S の補正が不要とは言えず、使用する全ての電離箱に対して両者の深さ依存を明らかにすることが求められる。そこで本章では正確な PDD を取得すべく各電離箱で k_{pol} および k_S を決定し、その影響について明らかにすることを目的とする。

3.2 方法

3.2.1 極性効果補正係数の決定

本研究では NACP-02、Roos および Advanced Markus の 3 種類を対象としており、各タイプで 3 つのシリアルナンバーを使用している。これは EPOM のばらつきを評価するためであり、このことに伴い k_{pol} の評価についても各シリアルナンバーで実施した。表 3.1 は本研究で使用した各電離箱のシリアルナンバーと、通常使用する印加電圧および電離箱内構造の寸法である。また、基準検出器としている microDiamond 検出器の構造についても表 3.1 に記載している。

k_{pol} は EPOM 決定の際に計測した PDI から取得できる電流値を用いて決定した。PDI を取得する際に使用したファントムは Blue Phantom²、ソフトウェアは OmniPro Accept (IBA Dosimetry 社) を用いた。このソフトでは電荷量 (nC) ではなく電流値 (nA) としてデータが取得される。通常 k_{pol} と k_s は電荷量より決定するが、電荷量と電流値は比例の関係にあることから、電流値でも代用可能である。PDI は 0.1 cm 間隔で計測されており、SSD は 100 cm、線量率は 1000 MU/min、各測定点で 3 秒の収集時間とした。そのため各測定点で照射された MU 値は約 50 MU となった。

k_{pol} は標準計測法 12 をはじめとした、各国の線量計測プロトコルに記載のある以下の算出方法により決定した。

$$k_{\text{pol}} = \frac{|M_{\text{raw}}^+| + |M_{\text{raw}}^-|}{2|M_{\text{raw}}|} \quad (3)$$

ここで $|M_{\text{raw}}^+|$ および $|M_{\text{raw}}^-|$ は正負の極性でそれぞれ取得した電位計の表示値であり、 $|M_{\text{raw}}|$ は臨床で使用している極性の表示値である。本研究では $|M_{\text{raw}}|$ に正の極性を採用している。なお、使用した OmniPro Accept では正の印加電圧を付与すると、収集される電荷は負イオンとなる。エネルギーは 6、12、18 および 22 MeV とし、照射野は全エネルギーで側方電子平衡が成立すると考えられる $20 \times 20 \text{ cm}^2$ とした。値は d/R_{50} を 0.1~1.2 まで 0.1 間隔で算出し評価した。各電離箱で使用した印加電圧は表 3.1 に示すとおりである。

3.2.2 イオン再結合補正係数の決定

k_S は k_{pol} と同様に PDI 測定時に取得できる電流値から決定した。PDI の測定条件、エネルギー、照射野などの条件に加え評価法も同様の手法とした。標準計測法 12 では k_S の決定に 2 点電圧法を推奨していることから、本研究でも 2 点電圧法を採用した。この手法では以下の式より k_S が決定される。

$$k_S = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \quad (4)$$

ここで M_1 および M_2 は電圧 V_1 および V_2 でそれぞれ取得した計測値である。本研究では M_1 および M_2 が電流値にあたり、 V_1 は表 3.1 に示した印加電圧、 V_2 は全ての電離箱で共通の 100 V とした。ここで定数 a_0 、 a_1 および a_2 は表 3.2 に示した値である。本研究で使用した TureBeam はパルス放射線であるため、表 3.2 に記載のある値のうち、パルス放射線に該当する定数を使用している。2 点

電圧法では k_S の値が1.05を超えると、式による計算では不確かさが大きくなる。そのため算出結果が1.05を超える場合は外れ値として扱い、評価点近傍の結果から線形近似を行うことで値を決定した。式(4)で使用する M_1 および M_2 に対しては3.2.1で決定した k_{pol} を使用し、極性の影響を補正した。

3.3 結果

3.3.1 極性効果補正係数の決定

全ての電離箱タイプで k_{pol} は深さにより変化する結果となった。図 3.1 に各電離箱で決定した k_{pol} の深さ依存の傾向を示す。NACP-02 および Roos は、 $d/R_{50}=0.6$ 近傍まではほぼ一定の値をとり、その後は上昇傾向にある。その一方で、Advanced Markus は深くなるにつれ値は低下したが、6 MeV では全てのシリアルナンバーで $d/R_{50}=0.5$ 以降に値が上昇する結果であった。深さによる k_{pol} の最大変化は NACP-02、Roos および Advanced Markus のそれぞれで、1.62%、1.36%、1.71%であり、最も深さ変化の小さな電離箱タイプは Roos であった。同じ電離箱タイプで k_{pol} の値を比較すると、NACP-02 と Roos は浅い領域では全てのシリアルナンバーで同様の値となったが、Advanced Markus に他の2つの電離箱タイプのように同様の値とならず、ばらつきが確認できた。

3.3.2 イオン再結合補正係数の決定

全ての電離箱タイプで k_S は深さとともに変化する結果を示した。各電離箱で決定した k_S の結果

は図 3.2 のとおりであり、全ての電離箱タイプで深さとともに値は減少する傾向を示した。浅い領域における各電離箱タイプの k_S は、NACP-02 が最も大きな値を示し、次いで Roos、Advanced Markus の順に値は小さくなった。深さによる k_S の最大変化は、NACP-02、Roos および Advanced Markus のそれぞれで、1.70%、1.13%、0.64%の低下であり、最も深さ変化の小さな電離箱タイプは Advanced Markus であった。全ての電離箱タイプで公称エネルギーの変化による k_S の傾向に大きな変化は生じなかった。

3.4 考察

3.4.1 極性効果補正係数の決定

k_{pol} は電離箱タイプによって異なる値を示すことを明らかにした。極性効果はステムとケーブル部分などの絶縁体や集電極に電子が止められることが原因により発生する。なかでも電子線に対する平行平板形電離箱の極性効果は、集電極後方に存在する絶縁体への電荷付与も大きく関係することが分かっている²⁹⁾。これら電離箱を構成する部品への電荷付与がノイズとして収集されてしまうため、 k_{pol} は1とは異なる値をとる。したがって、これらの電離箱構造は可能な限り小さいことが望ましい。また相対的にノイズを低減させることも k_{pol} を小さくする要因であるが、これは有感体積を大きくすることにより達成される。NACP-02 および Roos は、Advanced Markus と比べると集電極の半径は2~3倍大きく、有感体積はおよそ10倍大きい。このことから、集電極が k_{pol} に及ぼす影響は Advanced Markus が最小であるが、有感体積の大きな NACP-02 および Roos は信号が大きくなり、ノイズ成分が相対的に低減されたことにより k_{pol} は1に近い値を取り

続けたと考えられる。対して Advanced Markus は上述した要因に加え、集電極後方に存在する絶縁体の厚みが 3 つの電離箱タイプのなかで最も厚く、絶縁体で吸収される電荷量は最も多くなることが予想される。Pearce ら³⁰⁾も Advanced Markus の集電極後方の PMMA の厚みが k_{pol} に影響を与えていることを示唆している。これらが重なったことでノイズは増加し Advanced Markus の値は 1 から乖離したと考えられる。

k_{pol} の深さによる変化は測定点のエネルギーに関連する²⁹⁾。エネルギーの低下に伴い電離箱構造内の絶縁体などに止められる入射電子数は増加することが考えられる。特に深さでエネルギーの変化する電子線では有意となる。したがって、エネルギーに対する k_{pol} の変化を明らかにすることは、 k_{pol} の深さ変化を検証することにつながる。そこで各深さの平均エネルギー $\overline{E_d}$ を算出し、 $\overline{E_d}$ に対する k_{pol} の変化を評価した。

$\overline{E_d}$ の決定のためには平均入射エネルギー $\overline{E_0}$ が必要となる。この $\overline{E_0}$ と R_{50} の間には以下の関係が成り立つ¹¹⁾。

$$\overline{E_0} = 0.022R_{50}^2 + 2.059R_{50} + 0.656 \quad (5)$$

算出された $\overline{E_0}$ から $\overline{E_d}$ は以下のように決定される。

$$\overline{E_d} = \overline{E_0}(1 - d/R_p) \quad (6)$$

ここで R_p は microDiamond 検出器で取得した PDD をもとに決定した。

$\overline{E_d}$ に対する k_{pol} の変化は電離箱タイプによって異なり、NACP-02とRoosは同様の傾向となり、Advanced Markusのみ異なる挙動となった。図3.3は全てのシリアルナンバーの結果を包含しており、電離箱タイプごとにプロットしている。なお、このプロットはSSDを一定にした状態で深さによる $\overline{E_d}$ の変化を示したものであるため、深くなるにつれ照射野は大きくなり、ケーブルに照射される体積は増加していることに留意する必要がある²⁹⁾。 $\overline{E_d}$ が3 MeVよりも大きなエネルギー領域では、NACP-02およびRoosは一定の値を示したが、Advanced Markusでは値が緩やかに低下した。また3 MeVより低いエネルギーでは、全ての電離箱タイプで値は上昇した。ここで示したRoosの傾向は、Muirら²⁴⁾が報告している傾向とは異なるものであった。彼らは90%深(R_{90})までの結果を使用しており、エネルギー減少とともに k_{pol} は低下する傾向を示した。本研究で取得したRoosの k_{pol} は200 Vであり、彼らは100 Vで取得している。また照射野に関しても、本研究で使用した $20 \times 20 \text{ cm}^2$ と彼らを使用した $10 \times 10 \text{ cm}^2$ では、照射されているケーブルの範囲も異なる。これらの要因から同一の傾向とならなかったことが考えられる。Advanced Markusは集電極後方の絶縁体の厚みと有感体積のサイズが影響し、エネルギーの低下とともに相対的にノイズ成分が増加したことで値はなだらかに低下したと考えられる。全ての電離箱タイプに共通した3 MeV以下の領域における値の上昇は、エネルギーの低下により絶縁体で止められる電子数が増加したことが要因と考えられる。さらに低エネルギー領域は R_p 近傍であり、有感体積内に入射する一次電子線そのものの数が少なく、ノイズ成分が増加したことも値に変化が生じた要因と考えられる。

エネルギーに対して変化の小さかった NACP-02 と Roos について、3 MeV 以上の領域で決定された k_{pol} の平均値のばらつきについて調査したところ、ばらつきは小さい結果となった。表 3.3 は各シリアルナンバーで決定した k_{pol} の平均値をまとめたものであり、各タイプで決定した平均値も記載している。この結果から電離箱タイプ間でのばらつきは小さいことが確認され、エネルギーの高い領域ではシリアルナンバーによらず同一の値の使用が可能であることが示唆された。それに対して 3 MeV よりも低いエネルギー領域では、 k_{pol} は大きな変化を示すことから二次近似式での補正を行った。図 3.3 に示した全シリアルナンバーを対象に、単一の近似式を作成し値を決定すると、実際の計測から取得した結果との最大誤差は NACP-02 で 0.50%、Roos で 0.52% となる。これらの最大誤差は R_p 近傍で発生するため、臨床に大きな影響を与える深さではない。そのため低エネルギー領域においても、全シリアルナンバーに対し単一の近似式により k_{pol} を決定することは可能であることが示唆された。これらの結果から NACP-02 および Roos の k_{pol} に深さ変化について、同じ電離箱タイプ間でばらつきは見られない結果であったといえる。

Advanced Markus は、 $\overline{E_d}$ に対する k_{pol} の変化が他の 2 つの電離箱と比べて大きく、エネルギーの高い領域でも単一値の使用は適さない。そこで、図 3.3 に示す全シリアルナンバーを対象に作成したプロットから 3 MeV を境とした 2 つの領域で近似式を作成し値を決定した。3 MeV 以上の領域を対象として作成した単一の近似式から値を決定すると、実際に決定した結果との最大誤差は -0.69% であった。同様の手法を 3 MeV 以下の領域に対して実施すると、最大誤差は -0.83% となった。どちらの領域も単一の近似式からの値の決定は誤差が小さな結果である。このため、Advanced Markus では単一値の使用は不適であるが、3 MeV を境とした 2 つの領域に対してそれ

ぞれ単一の近似式を全てのシリアルナンバーに対して使用することも可能であることが示唆された。したがって Advanced Markus についても深さ変化の傾向については、ばらつきが確認されない結果であった。

以上の結果から各電離箱タイプで k_{pol} は深さ依存を示すが、ばらつきは小さいことが確認された。しかしながら本研究では EPOM のばらつきを調査することを目的としており、 k_{pol} のわずかなばらつきが最終的に算出される EPOM に影響を与える可能性もある。したがって、PDI に対する k_{pol} の深さ変化は各シリアルナンバーで実施することとし、以下の手順により補正をすることとした。

- NACP-02 および Roos

各シリアルナンバーで表 3.3 に示す値を $\overline{E_d}$ が 3 MeV となる深さまで使用する。なお 3 MeV となる深さは 6、12、18、22 MeV でそれぞれ $d/R_{50}=0.60, 0.89, 1.00, 1.03$ に相当する。それよりも深い領域では、各シリアルナンバーで k_{pol} が $\overline{E_d}$ の変化でどのような傾向となるかを見極め、近似式を算出することで値を決定する。

- Advanced Markus

一定値は設定しない。3 MeV を基準に 2 つの領域に分割し、各領域に対してシリアルナンバーごとに $\overline{E_d}$ に対する k_{pol} の変化を近似式として作成し値を決定する。

3.4.2 イオン再結合補正係数の決定

k_S に関しても電離箱タイプごとに異なる深さ変化を示すことを明らかにした。 k_S は空洞内での電荷再結合による収集効率の低下を補正するものである。本研究では標準計測法 12 の推奨する 2 点電圧法により k_S を決定したが、Boag ら³¹⁾は収集効率 f を決定することで k_S の算出を行った。

Boag は f を次式で決定し、 k_S との関係式を決定した。

$$f = \frac{v}{e^v - 1} \quad (7)$$

$$v = \frac{\mu p d^2}{V} \quad (8)$$

$$k_S = \frac{1}{f} \quad (9)$$

ここで μ は定数 (3.00×10^{10})、 p は電離箱内で集められたパルス当たりの電荷密度、 d は電極間隔、 V は印加電圧である。電荷密度はその場に付与される線量と関連しており、一般に電荷密度ではなく線量という言葉を使用したパルス当たりの線量 (Dose per pulse; Dpp) と記述されることが多い。したがって、Boag らが決定した式から電荷再結合は Dpp、電極間隔および印加電圧に影響を受けることがわかる。

本研究の結果から Advanced Markus が最も k_S の値は小さい結果となった。これは他の 2 つの電離箱構造と比較して電極間隔が狭く、通常使用する印加電圧が高いことが要因である。NACP-02 と Roos を比べると、Roos のほうが k_S は低い値となった。この 2 つの電離箱は過去にも比較されている。50 台の NACP-02、40 台の Roos を使用し電離箱特性を比較した Bass らの報告³²⁾では実

効電極間隔 d_{eff} について決定しており、これは実験的な計測結果から決定される電離箱の電極間隔³³⁾を意味する。彼らは両タイプの電極間隔が 2 mm で設計されているなか、 d_{eff} は NACP-02、Roos のそれぞれで 2.13 ± 0.21 、 1.82 ± 0.07 mm と設計値と異なる値であり、NACP-02 のほうが d_{eff} は大きな値となることを明らかにした。この結果は Roos の k_S が NACP-02 よりも低くなることの要因であり、本研究でも同様の結果を取得した。また NACP-02 と Roos の d_{eff} が設計と異なる値を示した理由として、保護電極の影響が考えられている³³⁾。図 3.4 は保護電極幅が不十分な電離箱と十分な電離箱で電荷の流れを図示しているものである³⁴⁾。十分な保護電極幅が無い場合、側壁からの散乱電子が有感体積内に入射する。この電子成分が再結合効果を助長している可能性があり、NACP-02 の d_{eff} は設計よりも広がった可能性がある。一方で、Roos の d_{eff} は設計よりも狭くなっているが、これについて検討された報告はなく、今後の検討課題の一つとなる。

k_S の深さによる変化は電極間隔のような電離箱構造によるものではなく、Dpp に関連するものである。Dpp が高いとパルス当たりが発生する電荷が増えるため再結合が発生しやすく、 k_S と Dpp は線形関係にあることが明らかとなっている^{35,36)}。臨床で使用される加速器はパルスビームであり、TrueBeam の電子線は全てのエネルギーで線量最大深 (d_{max}) が 0.083 cGy/pulse となるように設定されている。Dpp の変化は PDD の変化に基づくため、 k_S と Dpp の線形関係を明らかにすることは深さ変化を検証するために有用である。そこで、microDiamond 検出器で取得した PDD をもとに各深さの Dpp を決定し、本研究で取得した k_S との関係性を評価した。その結果、本研究においても全ての電離箱タイプで Dpp と k_S の間に線形関係が認められた。図 3.5 は全シリアルナンバーの結果を包含した各タイプの Dpp 依存性であり、線形近似も示している。計測点が多いこと

から Dpp の近い計測点については平均を算出している。NACP-02 が最大の傾き、Advanced Markus が最小の傾きを示しており、この傾向は Muir らの報告³⁵⁾と一致している。この結果から深さ変化の要因は Dpp の変化であるが、変化の傾きについては電離箱構造に影響を受けることが確認できる。Dpp と k_S は線形関係にあり、Dpp は PDD と同様に変化することから、 k_S は PDD と同様の変化となることが示唆された。また、図 3.5 に示した線形近似から求めた k_S と実際に各シリアルナンバーで計測により決定した k_S を比較すると、最大誤差は NACP-02、Roos および Advanced Markus でそれぞれ -0.56%、0.58%、0.34% であった。そのため k_S は全シリアルナンバーに対して単一の近似式により値を決定することが可能であり、同じ電離箱タイプ間での深さ変化のばらつきは小さいことが明らかとなった。

再結合の深さによる変化は大きいものの、線質指標である R_{50} に与える影響は小さく、必ずしも k_S の深さ補正が必要ではないことが示唆された。 d_{\max} と比較して R_{50} ($=0.042$ cGy/pulse) における k_S は、NACP-02、Roos および Advanced Markus のそれぞれで -0.63%、-0.44% および -0.18% となる。NACP-02 が最も大きな変化であるが、 k_S の補正の有無による PDD を比較すると R_{50} に変化はなく同一の値であった。より深い領域ではこの差がさらに大きくなるが、 d_c や $(\bar{L}/\rho)_{w,air}$ を算出するために必要な R_{50} については PDD に対する k_S の補正の有無によらない。電子線を使用した治療では、主に R_{90} や 80% 深 (R_{80}) などの高線量領域が一般に使用されるが、これら浅い領域での k_S の変化はわずかであり PDD に大きな変化は見られない。したがって、本研究で調査した電離箱タイプについては、 k_S の深さ変化を補正しなくても、臨床で使用する主な線量指標に影響はないことが確認された。

以上の結果から各電離箱タイプで k_S は深さ依存を示すが、ばらつきは小さく、臨床上は補正が不要であることが確認された。しかし、本研究の目的である EPOM の決定には R_{50} よりも深い領域のデータが必要となり、 k_S の変化も大きくなっていく。 k_{pol} のばらつきでも述べたように、 k_S の深さ依存のわずかな違いが各電離箱の EPOM 変化に寄与するおそれもあるため、 k_S についても深さ依存を補正することとし、以下のように対応した。

- ・全ての電離箱タイプ

深さにともなう Dpp の変化を全てのエネルギーで明らかにする。そして Dpp に対する k_S の変化を決定しシリアルナンバーごとに1つの線形近似を作成する。この近似式をもとに、深さによる k_S の変化を補正する。

本章では各シリアルナンバーについて k_{pol} および k_S について決定したが、研究の限界が2つ挙げられる。1つ目は値の決定方法である。本研究では PDI のスキャニングデータから両者の値を決定したが、この手法では各測定点での値のばらつきが大きくなる可能性が十分にある。各測定点で 50 MU ほどの照射は行われているが、スキャニングを行っていることにより水面にゆれが生じる。特に電子線は深さによるエネルギー変化が顕著であるため、スキャニング計測による補正係数の決定は最終的に決定する EPOM に影響を及ぼす可能性がある。理想的な決定は定点計測であるが、スキャニングでも値の決定は可能であり、簡便に値を決定する有効な手法であると考えられる。2つ目は値の決定に単一加速器の出力のみを使用したことである。本研究では深さ

変化に対応すべく近似式を作成したが、他の加速器の出力に対してこの式が適用できるかは不明である。既に示したように、 k_{pol} および k_S の深さ変化が臨床には大きく影響しないものの、正しい計測ができているとは言えない。両補正係数の深さ変化を正しく補正したい場合は、加速器ごとに深さ変化を明らかにすべきである。

3.5 結論

本章では PDI から得られたデータをもとに、 k_{pol} および k_S の深さ変化について検証した。 k_{pol} と k_S の深さ変化について、 k_{pol} はエネルギーに依存するものであり、 k_S が D_{pp} の変化に依存するものであった。両者の値については電極間隔や保護電極などの電荷収集のための構造物のみならず、空洞周囲の絶縁体などの厚さにも依存する可能性が高いことが明らかとなった。ただし、両係数の深さ依存の補正の必要性は、補正の有無が線量指標に大きな影響を与えないため、ユーザー自身に判断が求められる。各電離箱で決定した k_{pol} および k_S の深さ変化のばらつきについては小さく、各電離箱タイプで決定した単一の値および近似式を全てのシリアルナンバーに使用することが可能であった。ただし、本研究で決定した値および近似式は、単一の加速器から決定されたものであり、他の加速器に利用可能であるかは不明である。深さ依存を補正する際は使用する加速器で十分な検討を行ったうえ実施することが望ましい。

第 4 章 平行平板形電離箱の測定実効点の決定

4.1 目的

これまでの章では電離箱の EPOM を決定するために、リファレンスデータを取得する microDiamond 検出器の評価に加え、実際に対象とする電離箱の k_{pol} および k_{S} の深さ依存について評価した。microDiamond 検出器は基準検出器として、エネルギー依存性が十分に小さく、さらに分解能が高い検出器であることを確認した。また各電離箱の k_{pol} および k_{S} について、深さ依存をシリアルナンバーごとに補正することを確認した。

本章では実際に PDD を取得し microDiamond 検出器のデータを基準に各電離箱の EPOM を実験的に決定する。取得した EPOM について、エネルギー依存性および同じ電離箱タイプにおける EPOM のばらつきを調査する。

4.2 方法

4.2.1 EPOM の決定方法

EPOM の位置は PDD を用いて決定する。この手法は Wang ら¹²⁾ や Voigts-Rhetz ら¹⁶⁾ によって報告されたものと同じである。この手法では初めに EPOM を決定するための評価範囲を設定し、その範囲内に存在する PDD の結果から $(\text{rms}(\Delta d))^2$ を以下の式で算出する。

$$(\text{rms}(\Delta d))^2 = \frac{1}{n} \sum_i \left(D_{\text{Dia}}^i(d + \Delta d) - (\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}(d) \cdot \bar{D}_{\text{det}}(d) \right)^2 \quad (10)$$

ここで d は深さ、 D_{Dia}^i は microDiamond 検出器で取得した PDD 値、 $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}(d) \cdot \bar{D}_{\text{det}}(d)$ が電離箱で取得した PDD に対応する。図 4.1 は本手法の概略図である。 $(\text{rms}(\Delta d))^2$ が最小となる Δd が、平行平板形電離箱の基準点として考えられている電離空洞内前面の中心から EPOM までのシフト値と規定される。 $(\text{rms}(\Delta d))^2$ を算出するための Δd の間隔は 0.01 cm とした。評価範囲はファントム表面の 0.1 cm から $d/R_{50} = 1.2$ までを範囲としている。この深さは R_p 近傍であり、これよりも深くなると制動放射領域となり一次電子線が主とはならない。さらに電離箱の PDD 決定に使用している $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ は Burns らの近似式³⁷⁾を使用している。彼らは以下の回帰式を使用して $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ の深さ変化を決定した。

$$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{w,air}}(R_{50}, d) = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3y}{1 + a_4x + a_5x^2 + a_6x^3 + a_7y} \quad (11)$$

ここで x は $\log_e R_{50}$ 、 y は d/R_{50} であり、 $a_0 \sim a_7$ は以下のとおりである。

$$a_0 = 1.0752 \quad a_1 = -0.50867 \quad a_2 = 0.08867 \quad a_3 = -0.08402$$

$$a_4 = -0.42806 \quad a_5 = 0.064627 \quad a_6 = 0.003085 \quad a_7 = -0.1246$$

式 (11) を使用する際の条件として、 $1 \text{ cm} \leq R_{50} \leq 19 \text{ cm}$ 、 $0.02 \leq d/R_{50} \leq 1.2$ が存在する。そのため、正しい PDD 評価は $d/R_{50} = 1.2$ までしかできないと考えられる。以上のことを踏まえ、本研究の評価範囲を設定した。

4.2.2 PDD の取得

全ての PDI 計測に BluePhantom² を使用し、0.1 cm 間隔の step by step により計測した。なお、ここで取得した電離箱の PDI データは k_{pol} および k_{S} の元データとしたものである。TrueBeam を使用し、エネルギーは 6、12、18、22 MeV とした。SSD を 100 cm とし、照射野は $20 \times 20 \text{ cm}^2$ とした。測定結果の再現性を担保するため、各測定は数日間にわたって複数回の測定を行った。モニタ線量計には円筒形電離箱の CC13 (IBA Dosimetry 社) を使用した。

電離箱を用いた PDI 計測では標準計測法 12 に倣い、電離空洞内前面の中心を測定点に使用した。取得した PDI に対し k_{pol} 、 k_{S} および式 (11) から決定した $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ を補正することで PDD へと変換しており、擾乱係数は補正していない。 k_{TP} については短時間計測であり、水温・気圧の変動がないことを確認しているため、補正は不要である。

microDiamond 検出器についてはエネルギー依存がないため、取得データをそのまま PDD として扱うこととした。なお、検出器内の不純物の影響を低減するため、約 5 Gy のプレ照射を行った³⁸⁾。線量計測は検出器先端から 0.1 cm 下縁にある有感体積部分で行った³⁹⁾。これが $\Delta d = 0 \text{ cm}$ に相当する。取得したデータをもとに Excel (Microsoft 社) を使用して、 $\Delta d = -0.1 \sim 0.1 \text{ cm}$ まで、0.01 cm 間隔でシフトさせた PDD を作成した。これら複数の PDD を作成し、式 (10) から EPOM までの最適な Δd を決定した。

4.3 結果

4.3.1 EPOM のエネルギー依存性

最適な Δd はエネルギー依存を示すことが明らかになった。図 4.2 に 3 つの電離箱タイプに対し線質の変化に対する最適な Δd を示す。ここで正の値は電離空洞内前面の中心から空洞側へ向かってシフトしていることを示している。この結果は全てのシリアルナンバーを加味したものである。本研究で調査した電離箱タイプは多くの EPOM が空洞側に位置することが確認された。また、この EPOM の位置と表 3.1 に示している入射窓を水等価厚 (g/cm^2) とは異なる位置であった。各電離箱でビームエネルギーの増加とともに Δd は増加するが、エネルギーが最大のときに Δd が最大とはならなかった。全ての電離箱タイプで 6 MeV が最小の Δd 、18 MeV が最大の Δd を示しており、その差は NACP-02、Roos および Advanced Markus のそれぞれで 0.026、0.020 および 0.021 cm であった。また EPOM のエネルギー変化率は NACP-02 が最も大きな結果であり、Advanced Markus が最も小さな変化率であった。

4.3.2 EPOM のばらつき

最適な Δd について、同一電離箱タイプ間でのばらつきは確認されなかった。図 4.3 に各シリアルナンバーの平均 Δd を先行研究^{12,15-18)}の結果とともにプロットしている。先行研究の結果については、表 1.1 より抜粋している。NACP-02、Roos および Advanced Markus の 3 つのシリアルナンバーの平均 Δd はそれぞれ 0.104 ± 0.011 、 0.040 ± 0.012 、 0.012 ± 0.009 cm であった。Roos は他の電離箱と比べて、ばらつきがわずかに大きな結果となった。また、Roos および Advanced

Markus の Δd は先行研究と同様の結果であったが、一方で、NACP-02 は先行研究よりもおよそ 0.04 cm ほど大きな値となり、一致しない結果であった。

4.4 考察

平行平板形電離箱の EPOM は多くが電離空洞内に位置することを確認した。EPOM は全ての擾乱補正係数の深さ依存を最小にする位置であることから、入射窓の水等価性、空洞の影響、側壁と背面壁からの線量寄与についても考慮することが可能な測定点となる¹⁵⁾。電離箱の入射窓について水等価厚に基づいた線量評価も実施されるが、これは入射窓の水等価性のみを考慮したものであり、そのほかの影響は加味されない。そのため、本研究で決定した EPOM と水等価厚は違う位置となる。

本研究で実験的に決定した EPOM にはエネルギー依存があることを明らかにした。これは各公称エネルギーで擾乱補正係数が深さによる変化の程度が異なることに基づく。Roos について Zink ら¹³⁾が本研究と同様の手法により最適な Δd について報告しており、 d_{\max} よりも深い計測データのみを使用して決定された Δd は、6、21 MeV のそれぞれで 0.026 および 0.040 cm であった。この結果については本研究と非常に一致するものであった。また Muir ら⁴⁰⁾は、 Δd が R_{50} に対し 0.0025 の傾きを持って変化することを報告しているが、これは本研究の結果である 0.0029 に非常に近い値であり、彼らが実施した MC 計算と同様の変化を示した。NACP-02 について Wang ら¹²⁾が 6、22 MeV で最適な Δd を決定しており、具体的な数値は明らかにされていないものの、その差はおよそ 0.02 cm であり、本研究も同様の結果を示した。Advanced Markus について

Voigts-Rhetz ら¹⁶⁾が 6~18 MeV の最適な Δd を調査しており、彼らは 6 MeV で 0.007 cm の最大値を示しており、エネルギーの上昇とともに Δd は減少する結果を示している。これは本研究と異なる結果であり、本研究では 6 MeV で最小の結果を示し、 Δd はエネルギーとともに増加した。

Advanced Markus の有感体積は、表 3.1 に示しているように他の電離箱タイプと比較して非常に小さい。3章で示したように k_{pol} や k_{S} が影響し、MC 計算とは Δd の傾向が異なる結果となった可能性がある。特に Advanced Markus の k_{pol} は変化が大きいため、これが大きな影響であるとも考えられる。Roos と NACP-02 については Lacroix ら¹⁷⁾が実験的にエネルギー変化について報告している。彼らの報告では両電離箱タイプともに、最小エネルギー 6 MeV と最大エネルギー 18 MeV で Δd は 0.08 cm 変化している。彼らの決定した Δd について、電離箱の k_{pol} と k_{S} の深さ変化について補正を実施したかどうかは不明である。さらに、彼らガリファレンス検出器として採用したプラスチックシンチレーション検出器の有感体積は 2.08 mm³であり、microDiamond 検出器の有感体積 0.004 mm³よりも非常に大きい。したがって、体積平均効果が生じ、特に線量勾配の大きな低エネルギー電子線に対して、正しい基準データが取得できていない可能性がある。本研究で使用する microDiamond 検出器は有感体積が非常に小さく、体積平均効果の影響は小さいことが想定され、理想的な基準データが取得できていると考えられる。本研究で決定したエネルギー変化の程度は、先行研究で実施された MC 計算と同程度の変化であり、十分精度の高い結果であることを確認した。

製造公差の大きい平行平板形電離箱⁴¹⁾でも、同じ電離箱タイプ間での EPOM のばらつきは小さいものであった。Roos はすべてのシリアルナンバーが不確かさの範囲内で先行研究の結果¹⁵⁻¹⁸⁾

と一致しており、先行報告の値を使用することに問題がないことを確認した。このタイプの電離箱については、過去にも実験的に EPOM の位置が確認されており、多くの結果で同様の Δd を示している。これまでの結果を加味しても、全ての電離箱に対して同様の Δd を適用させることは問題ないと考えられる。Advanced Markus は先行研究^{15,16)}よりもわずかに大きな値を示したが、ばらつきは十分小さく、すべてのシリアルナンバーに単一の Δd を使用できることが示唆された。これまで実験的に検証されていなかった電離箱タイプではあるが、先行研究との差はわずか 0.01 cm であり実験の影響を排除することができる MC 計算によって決定された Δd を使用することも可能であると考えられる。NACP-02 も、すべてのシリアルナンバーに単一の Δd を使用することが可能である。しかし、本研究で決定した Δd は先行研究で報告されている値^{12,15-17)}よりも約 0.04 cm 大きいものであった。したがって、これまで報告されてきた値を使用すべきか、本研究で決定された Δd を使用すべきかが問題となる。NACP-02 の入射窓には不確かさがあることが報告されているが、これまで先行研究で行われてきた MC 計算は、設計図に基づいた電離箱モデルが使用されていると考えられる。これが先行研究と本研究の結果に相違が生じた要因とも想定される。そのため NACP-02 については EPOM の位置を追加で検証する必要がある結果となった。

最適な EPOM を使用した電子線線量計測は不確かさを低減できる可能性を持つ。国内外の線量計測プロトコルで推奨されている電離箱の測定位置は異なり、AAPM TG-51⁵⁾では入射窓を物理厚として扱い、TRS-398⁴⁾では入射窓の厚さと質量密度の積から決定した水等価厚、またドイツのプロトコルである DIN6800-2⁶⁾では入射窓の厚さと電子密度の積から決定された電子密度等価厚などプロトコルによって様々であることが分かる。この違いにより、 k_Q に追加される不確かさ

は 0.2~0.6%とされており²⁸⁾、これは d_{ref} における PDD の変化によって与えられる。本研究で決定した最適な Δd を考慮した場合とそうでない場合の d_{ref} の最大線量差は、6 MeV の NACP-02 で 0.3%と不確かさの範囲内と一致する。さらに Muir ら⁴⁰⁾は、最適な EPOM を使用することで R_{50} を関数とした k_Q のフィッティングカーブの精度は向上することを明らかにしている。これらのことから最適な EPOM を使用した絶対線量計測も可能であることが確認できる。また EPOM の使用は相対線量計測に対しても有効であり、現在のプロトコルでは PDI から PDD への変換は $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ にのみ基づいている。最適な EPOM の使用は全擾乱補正係数の深さ変化を最小化し、PDD への線量変換の不確かさの低減にも寄与すると考えられる。

本章では実験的に EPOM を決定したが、研究の限界が2つ挙げられる。1つ目は実験的要因である。MC 計算では、加速器の出力変化を考慮することなく、さらに電離箱のセットアップなどの不確かさは存在しない。実験的決定ではこれらが不確かさとして加わる。また前章で述べたように、各電離箱の k_{pol} および k_S などが影響を与えている可能性もある。本研究における不確かさは、全ての結果において 0.015 cm 以内であり、これら上記の要因を排除して実験的に値を決定することは不可能である。このことが MC 計算で決定された先行研究の値と本研究の値がわずかに異なる理由であると考えられる。2つ目は電離箱のサンプル数である。同じ電離箱タイプ間での EPOM のばらつきについて、本研究で使用した3つのシリアルナンバーでもばらつきは小さな結果であったが、正確な評価のためには、より多くのサンプル数を検証することが望ましい。このようなばらつきを調査するためにも、EPOM は MC 計算ではなく実験的に明らかにすべきである。

4.5 結論

本章ではPDDを使用して、実験的に電離箱のEPOMの位置を明らかにした。各電離箱のEPOMは空洞内に位置することが明らかとなり、このEPOMまでのシフトはエネルギーに依存して変化することを確認した。また、同一電離箱タイプ間のEPOMのばらつきについても調査した。本研究ではEPOMのばらつきは確認されず、電離箱タイプが同一であれば、単一の Δd の使用が可能であることが確認された。

第 5 章 NACP-02 電離箱の入射窓の不確かさの検討

5.1 目的

前章では実験的に電離箱の EPOM を決定したが、NACP-02 は先行研究よりも大きな値を示した。Roos および Advanced Markus については、先行研究と非常に良い一致を示していることから、microDiamond 検出器の結果は基準検出器としての役割を果たしているといえる。NACP-02 については入射窓の不確かさについて報告されており、本研究の結果についてもこのことが影響を及ぼしている可能性がある。そこで本章では NACP-02 について、MC 計算を使用し入射窓の厚さおよび密度を変更した仮想的な電離箱モデルを作成し、それらの EPOM を決定する。さらに前章で決定した EPOM と比較することで、先行研究との乖離について再検討することを目的とする。

5.2 方法

5.2.1 ビームモデリング

NACP-02 の EPOM を MC 計算にて決定する前に、本章で使用する線源データのビームモデリングを行った。MC 計算で決定した $EPOM_{MC}$ と実験的に決定した $EPOM_{meas}$ を比較するためには、MC 計算で使用する phase space file の線質が実際に使用した加速器と同一であることが望ましい。そこで加速器から取得した microDiamond 検出器の R_{50} と同一の線質となるように、入射電子のエネルギー調整を行うこととした。前章の結果から EPOM はエネルギーに依存することが明らかになっているため、本章で検証するエネルギーは 6 MeV のみとした。

入射電子のエネルギー調整は PDD の比較により行った。TureBeam の phase space file は、Varian 社が以前に提供してきたリニアックモデルとは異なり、加速器ヘッド内の jaw よりも上流のジオメトリ情報を配布していない。そのため本研究において、ヘッド内構造を変化させて線源データを変化させることは困難となる。そこで phase space file から放出される全ての入射電子のエネルギーを仮想的に 0.10 MeV 間隔で増加させることによりエネルギー調整を行った。図 5.1 は本研究で使った phase space file のエネルギースペクトルであり、入射電子にエネルギーを増加させることでスペクトルは高エネルギー側へシフトし、線質はより高いものとなる。なお、スペクトル形状そのものには変化はない。このようにエネルギーを増加させて複数の PDD から R_{50} を決定した。PDD の取得には egs_chamber で作成した water voxel を使用しており、半径 0.5 cm、厚さ 0.02 cm としている。この PDD を 0.1 cm 間隔で取得し、得られた R_{50} と実際に microDiamond 検出器で取得した R_{50} が同一となるようにエネルギー調整を繰り返し行った。また、エネルギー調整のみで PDD が同一形状となるか評価すべく、増加させたエネルギーの PDD と実際の加速器から取得した microDiamond 検出器および平行平板形電離箱の各タイプの PDD を比較した。表 5.1 はエネルギー調整を実施した際のシミュレーションパラメータである。

5.2.2 NACP-02 の電離箱モデリングおよび EPOM の決定

設計図をもとに egs_chamber を使用して仮想的に NACP-02 を作成した。次に NACP-02 の入射窓の厚さおよび密度を変化させた仮想モデルを 3 つ作成し、計 4 つの電離箱モデルで MC 計算を実施した。この詳細を表 5.2 および図 5.2 にまとめる。モデル No.1 は設計図通りに作成された

ものであり、先行研究で多く検討されている形状である。モデル No.2 は Wang ら¹²⁾が検討した形状であり、入射窓の構成材質である Graphite 層と Mylar 層の厚さを 1.5 倍したものである。このモデルでは密度は変更していない。モデル No.3 は Muir ら¹⁵⁾が検討した形状であり、入射窓の厚さは変化させていないものの Graphite 層の密度を 2.25 g/cm^3 に変更している。モデル No.4 は Chin ら¹⁹⁾が実際に電離箱を破壊し、入射窓の実寸サイズから作成したものである。このモデルは Mylar 層の厚さと Graphite 層の密度を変化させたものである。上記のうちモデル No.2 および 4 については入射窓の厚さを変更しているが、厚くしただけ空洞サイズを薄くするようにモデリングをした。

これらのモデルに対し式 (10) を使用することで、各モデルの EPOM の位置を MC 計算により決定した。各電離箱モデルで MC 計算により PDD を取得するが、計算時のジオメトリは $40 \times 40 \times 30 \text{ cm}^3$ の水ファントム、SSD を 100 cm、照射野は $20 \times 20 \text{ cm}^2$ としている。PDD は 0.1 cm 間隔で決定しており、MC 計算で得られる NACP-02 の PDD は空気吸収線量であるため、得られた結果に対し $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ の補正を行うことで水の PDD へと変換した。リファレンスデータはエネルギー調整で取得した water voxel の PDD とした。実験的決定では仕様書通りの電離箱構造を想定し、NACP-02 の対しては電離箱表面から 0.06 cm 下縁にシフトした電離空洞内前面の中心での測定を実施している。EPOM_{meas} との比較のため MC 計算では前壁厚の密度や厚さを変化させても、電離箱表面から 0.06 cm 下縁の点を測定点として設定している。これらの MC 計算を実施する際のパラメータは表 5.3 に示す通りである。

5.3 結果

5.3.1 ビームモデリング

エネルギー調整を行っていない線源データで PDD を取得すると、 R_{50} は 2.31 cm となり microDiamond 検出器の R_{50} と一致しない結果であった。表 5.4 はエネルギー調整を繰り返して取得した water voxel で取得した R_{50} と、加速器から取得した microDiamond 検出器の R_{50} である。全入射電子に 0.20 MeV 増加させたシミュレーションが、最も一致する結果となった。図 5.3 は実際の加速器から取得した microDiamond 検出器の PDD と、MC 計算で仮想的にエネルギーを増加させた PDD である。 R_{50} の一致した +0.20 MeV のシミュレーション結果においても PDD 形状は一致せず、エネルギーの増加のみで形状を一致させることは困難であった。エネルギー増加による PDD 形状の変化は線量降下領域で顕著であり、ビルドアップ領域では変化が確認できなかった。また、図 5.4 には MC 計算でエネルギーを +0.20 MeV することで取得した PDD と実際に加速器から取得した各検出器の PDD の比較、さらに MC 計算を基準とした各検出器の線量誤差を示す。平行平板形電離箱の PDD については 4 章で決定した EPOM を適用していない。microDiamond 検出器で取得した線質に合うようにエネルギー調整を行っているため、線量誤差は microDiamond 検出器が最も小さく、この誤差と同等の結果を Advanced Markus が示した。次いで Roos が小さく、最も線量誤差の大きな検出器は NACP-02 となった。また、全ての検出器で深くなるほど線量誤差は大きくなり、 R_{30} では microDiamond 検出器においても -10% と大きな線量誤差が生じた。

5.3.2 NACP-02 仮想電離箱モデルの違いによる EPOM の相違

入射窓のわずかな変化により EPOM までのシフトは異なることが確認された。図 5.5 に 6 MeV で実験的に決定した各シリアルナンバーの $EPOM_{meas}$ までの Δd と、MC 計算により各モデルで決定した $EPOM_{MC}$ までの Δd を示す。 $EPOM_{meas}$ と最も乖離したモデルは No.1 の仕様書通りに作成したモデルであり、同等の Δd を示したモデルは No.2 および No.4 であった。MC 計算により決定した各モデルについて、最大の Δd は No.2 であり最小の Δd は No.1 であった。

5.4 考察

本研究では実際に使用している加速器と線質を同じ値とするために phase space file のエネルギー調整が必要であった。入射電子のエネルギーを増加させると R_{50} が大きくなり、本研究では全入射電子に対して 0.2 MeV 増加することで R_{50} は 0.1 cm 増加した。これは水に対する電子の阻止能に関連しており、ビームエネルギーが 6 MeV では、阻止能は約 $2 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ である。本検証の結果は阻止能の値からも想定されるものであった。エネルギーを増加させた water voxel の PDD と実際の加速器で取得した各検出器の結果を比較すると、microDiamond 検出器と同一線質を示した +0.20 MeV の PDD でさえも形状は異なる結果であった。図には示していないが、MC 計算により 6 MeV を使用して microDiamond 検出器の PDD を決定すると water voxel と同じ形状を示し、これは 2 章で示したエネルギー依存性を改めて確認する結果であった。MC 計算で調整した PDD と実際に電離箱計測から取得した PDD を比較すると、Advanced Markus、Roos、NACP-02 の順で差は大きくなった。この差は各電離箱タイプの Δd と関連しており、 Δd が小さな Advanced

Markus は microDiamond 検出器と同等の PDD を示すことから線量誤差は小さくなり、 Δd が大きな NACP-02 は線量誤差が大きくなったと想定される。このように MC 計算と実験により決定した PDD の間で差が生じた原因として、phase space file でモデル化された TrueBeam と実際の計測に使用した TrueBeam の間で入射電子のエネルギースペクトルに違いがあることが考えられる⁴²⁾。線量降下領域における R_{90} と R_{10} を用いた勾配 $\Delta R_{90/10}$ について、Rodrigues ら⁴³⁾ は値が大きいほど勾配は浅く、エネルギースペクトル幅が大きいことを示すと報告している。本研究で使用した phase space file の加速器モデルでは $\Delta R_{90/10}$ が 1.29 cm であるのに対し、実験で使用した加速器は 1.15 cm であり、MC 計算で使用した加速器のエネルギースペクトル幅がわずかに広い。この幅を変化させることで PDD 形状はより一致したものを取得することができる。しかし、加速器ヘッド内の上流のデータが公表されていない TrueBeam の phase space file では、エネルギースペクトル幅の調整は困難であり、エネルギーを増加させて線質を同一にする作業に限界がある。また、図 5.4 からも深くなるほど線量誤差が大きくなることから、MC 計算においてヘッド内で発生する光子成分の調整ができないことも要因として挙げられる。MC 計算で使用する phase space file に光子成分が増加することで、深い位置でも線量誤差は小さくなり実際の加速器との差が小さくなることが予想される。その一方で、わずかな PDD 形状の差が結果として算出される EPOM に大きな影響を及ぼすとは考え難い。以上より、本章で使用する phase space file はエネルギー調整のみを行った線源データを使用することとした。

実験的に決定した EPOM_{meas} と最も乖離した結果がモデル No.1 であったことから、本研究で使用した NACP-02 の全てのシリアルナンバーで仕様と異なる可能性が示唆された。設計図通りに

作成したモデル No.1 は、表 1.1 に示したこれまでの先行研究と同一の結果を示した。そのため、仕様書通りに作成した NACP-02 の MC 計算の再現性は良好であることがわかる。モデル No.2 および No.3 については Wang や Muir の報告^{12,15)}に基づいて作成したが、本研究の MC 計算で得られた結果と同様のものとなった。これまでの報告では Chin らが報告¹⁹⁾したモデルの EPOM について検討されていなかったが、MC 計算では No.2 や No.3 と同様の Δd であり、これは実験的に決定した EPOM_{meas} と良い一致を示す結果であった。Lacroix ら¹⁷⁾も述べているように電離箱の入射窓は非常に薄く、X線写真などで詳細を確認することはできない。そのため入射窓の詳細を確認する方法は、実際に電離箱を破壊することである。当然これは実用的でないため他の確認方法が必要となるが、実験的に EPOM を決定することは、NACP-02 の入射窓の不確かさを明らかにするためには良好な手法であることが示唆される。NACP-02 の Δd については、本結果からこれまで先行研究^{12, 14-17)}で報告されている 0.05~0.06 cm のシフトは正しいものではなく、より空洞側へのシフトが必要であることを示している。

以上の結果を踏まえると、NACP-02 の擾乱補正係数の値について見直す必要性が生じるが、このことについては既に Chin ら⁴⁴⁾や Zink ら²⁸⁾が報告している。Chin らは実際に NACP-02 を分解し、入射窓の詳細を明らかにしたデータをもとにモデルを作成し、そのモデルに対し 6 MeV における P_{wall} を調査している。 d_{ref} で決定された P_{wall} は仕様書通りのモデルと同等の値を示し、全擾乱補正係数で比較すると 0.3%ほど高い値を示した。これに対し R_{50} で決定された P_{wall} は、仕様書のモデルよりも 3%ほど高い値となり、深さによる P_{wall} の変化がより顕著になる結果であった。 d_{ref} までの深さについては P_{wall} の大部分が後壁と側壁からの影響であり、それよりも深い位置では

P_{wall} は入射窓の影響を大きく受ける⁴⁴⁾。Chin らが明らかにした電離箱モデルでは、入射窓のみが仕様と異なる結果であった。そのため d_{ref} では仕様書通りの電離箱モデルと同等の結果となり、 R_{50} のように深くなると入射窓の影響を大きく受け、結果として Chin らのモデルの P_{wall} が大きくなったと考えられる。この差は深くなるほど大きくなるものの、この差は R_{50} に大きな影響を及ぼさないため、臨床に対する影響は少ない。また Zink ら²⁸⁾は d_{ref} における k_Q について決定しており、仕様書通りのモデルと比較し Chin らのモデルでは0.6%ほど値が高くなることを明らかにしている。 k_Q は全擾乱補正係数の成分が大きいことを考慮すると、Chin らが報告した0.3%の相違と概ね一致する。そのため NACP-02 による絶対線量計測については、現行のプロトコルで使用されている k_Q を使用すると、線量をわずかに過小評価してしまう可能性がある。そのため NACP-02 を使用した絶対線量計測を行うためには、今後より詳細な電離箱モデルを明らかにする必要がある。

5.5 結論

本章では MC 計算を用いて、実験的に決定した NACP-02 の EPOM について検討を行った。NACP-02 の入射窓を変化させたモデルを作成し、実験的手法と同様の手順により EPOM を決定すると、最も一致した電離箱モデルは Chin らが報告したモデルであり、設計図通りのモデルは最も一致しない結果であった。この結果、本研究で使用した NACP-02 は全てのシリアルナンバーで設計図通りではないことが示唆された。

これらの結果に伴い NACP-02 を用いた電子線線量計測には注意を払う必要がある。現在の線量計測プロトコルで提供されている k_Q は0.6%ほど過小評価されている可能性があり、今後より

詳細な研究を実施する必要がある。

第6章 総括

電離箱を用いた線量計測において EPOM を使用することは、放射線治療における不確かさを低減させることにつながる。これまで EPOM は MC 計算を用いた方法が主流であり、これは実験的に検証することで発生する不確かさを低減できるメリットがあった。しかし、MC 計算では各シミュレーションパラメータや電離箱モデリングの精度の影響を受けてしまう。さらに電離箱によっては入射窓に不確かさを持つタイプも存在するため、MC 計算だけでなく実験的に検証する必要がある。そこで本研究では一般に電子線計測で使用される平行平板形電離箱を対象とし、各タイプの EPOM を実験的に明らかにすることを目的とした。

第2章では実験的に決定するための基準データの取得に microDiamond 検出器が適しているかを検証した。MC 計算により microDiamond 検出器と水で取得した PDD の比較から、microDiamond 検出器はエネルギー依存のない検出器であることを明らかにした。この結果から microDiamond 検出器を基準検出器として採用した。

第3章では電離箱による水吸収線量計測で必要となる k_{pol} および k_S の深さ変化について検討を行った。両者はどちらも深さに依存する結果であり、 k_{pol} はエネルギー、 k_S は Dpp に関する。本研究では両者の深さ変化に対して補正を施したが、この結果を補正しない場合についても PDD に大きな影響はないことが確認された。そのため臨床現場において、電離箱を使用して計測した PDI に対し k_{pol} および k_S の深さ変化の補正は任意であり、ユーザーの判断に委ねられる結果となった。

第4章では各電離箱の EPOM を基準検出器との PDD 比較により決定した。実験的に決定され

た EPOM のほとんどが空洞内に位置した。さらに EPOM にはエネルギー依存があり、エネルギーの上昇とともに Δd は大きくなることを明らかにした。また同じ電離箱タイプで EPOM を比較したが、ばらつきは確認されない。そのため電離箱タイプに応じて固有の Δd を適応させることも可能であった。

第 5 章では入射窓に不確かさを持つ NACP-02 の EPOM について、MC 計算により追加検証を実施した。本研究で使用した全てのシリアルナンバーで仕様と異なる可能性があり、これは先行研究の裏付けともなる結果であった。またこの結果に伴い、現在の線量計測プロトコルで使用されている NACP-02 の k_Q は、再検討する必要性があることを明らかにした。

本研究では平行平板形電離箱のみを対象とし EPOM の位置を明らかとした。電子線計測は平行平板形のみならず円筒形電離箱でも実施される。また NACP-02 のように不確かさの大きな電離箱も存在する。これらに対しても今後幅広い検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) ICRU. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of x or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures. ICRU Report 24. 1976;
- 2) Svensson GK, Baily NA, Loevinger R, et al. PHYSICAL ASPECTS OF QUALITY ASSURANCE IN RADIATION THERAPY. 1984;doi:10.37206/12
- 3) 日本医学物理学会. 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法. 通商産業研究社. 2014;第1版
- 4) Musolino SV. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water; Technical Reports Series No. 398. *Health Physics*. 2001;81(5):592-593.
- 5) Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys*. Sep 1999;26(9):1847-70. doi:10.1118/1.598691
- 6) DIN-2. Procedures of dosimetry with probe - type detectors for photon and electron radiation - Part 2: Ionization chamber dosimetry of high energy photon and electron radiation. *Technical Report, Normenausschuß Radiologie (NAR) im DIN*. 2008;
- 7) Araki F. Monte Carlo calculations of correction factors for plane-parallel ionization chambers in clinical electron dosimetry. *Med Phys*. Sep 2008;35(9):4033-40. doi:10.1118/1.2968102
- 8) Buckley LA, Rogers DW. Wall correction factors, P_{wall} , for parallel-plate ionization chambers. *Med Phys*. Jun 2006;33(6):1788-96. doi:10.1118/1.2199988
- 9) Wang LL, Rogers DW. Calculation of the replacement correction factors for ion chambers in megavoltage beams by Monte Carlo simulation. *Med Phys*. May 2008;35(5):1747-55. doi:10.1118/1.2898139
- 10) McEwen M, Palmans H, Williams A. An empirical method for the determination of wall perturbation factors for parallel-plate chambers in high-energy electron beams. *Physics in*

Medicine & Biology. 2006;51(20):5167.

- 11) *Review of Data and Methods Recommended in the International Code of Practice, IAEA Technical Reports Series No. 277, Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; 1996.
- 12) Wang LL, Rogers DW. Study of the effective point of measurement for ion chambers in electron beams by Monte Carlo simulation. *Med Phys*. Jun 2009;36(6):2034-42. doi:10.1118/1.3121490
- 13) Zink K, Wulff J. Positioning of a plane-parallel ionization chamber in clinical electron beams and the impact on perturbation factors. *Phys Med Biol*. Apr 21 2009;54(8):2421-35.
doi:10.1088/0031-9155/54/8/011
- 14) Ono T, Araki F, Yoshiyama F. Possibility of using cylindrical ionization chambers for percent depth-dose measurements in clinical electron beams. *Med Phys*. Aug 2011;38(8):4647-54.
doi:10.1118/1.3608903
- 15) Muir BR, Rogers DW. Monte Carlo calculations of electron beam quality conversion factors for several ion chamber types. *Med Phys*. Nov 2014;41(11):111701. doi:10.1118/1.4893915
- 16) von Voigts-Rhetz P, Czarnecki D, Zink K. Effective point of measurement for parallel plate and cylindrical ion chambers in megavoltage electron beams. *Z Med Phys*. Sep 2014;24(3):216-23.
doi:10.1016/j.zemedi.2013.12.001
- 17) Lacroix F, Guillot M, McEwen M, et al. Extraction of depth-dependent perturbation factors for parallel-plate chambers in electron beams using a plastic scintillation detector. *Med Phys*. Aug 2010;37(8):4331-42. doi:10.1118/1.3463383
- 18) Looe HK, Harder D, Poppe B. Experimental determination of the effective point of measurement for various detectors used in photon and electron beam dosimetry. *Phys Med Biol*. Jul 21 2011;56(14):4267-90. doi:10.1088/0031-9155/56/14/005
- 19) Chin E, Shipley D, Bailey M, et al. Validation of a Monte Carlo model of a NACP-02 plane-parallel ionization chamber model using electron backscatter experiments. *Phys Med Biol*. Apr 21

2008;53(8):N119-26. doi:10.1088/0031-9155/53/8/N01

- 20) Kawrakow I, Rogers DWO. The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport; NRCC Report PIRS-701, National Research Council of Canada.
- 21) Wulff J, Zink K, Kawrakow I. Efficiency improvements for ion chamber calculations in high energy photon beams. *Med Phys.* Apr 2008;35(4):1328-36. doi:10.1118/1.2874554
- 22) Pimpinella M, Stravato A. Monte Carlo simulation of radiation response of a novel diamond detector for radiotherapy dosimetry. *High Performance Computing on CRESCO infrastructure: research activities and results 2014*.148.
- 23) Bruggmoser G, Saum R, Schmachtenberg A, Schmid F, Schule E. Determination of the recombination correction factor k_S for some specific plane-parallel and cylindrical ionization chambers in pulsed photon and electron beams. *Phys Med Biol.* Jan 21 2007;52(2):N35-50. doi:10.1088/0031-9155/52/2/N01
- 24) Muir BR, McEwen MR, Rogers DW. Determination of relative ion chamber calibration coefficients from depth-ionization measurements in clinical electron beams. *Phys Med Biol.* Oct 7 2014;59(19):5953-69. doi:10.1088/0031-9155/59/19/5953
- 25) *Review of Data and Methods Recommended in the International Code of Practice for Dosimetry, IAEA Technical Reports Series No. 381, The Use of Plane Parallel Ionization Chambers in High Energy Electron and Photon Beams.* INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; 2000.
- 26) Wang LL, Rogers DW. Replacement correction factors for plane-parallel ion chambers in electron beams. *Med Phys.* Feb 2010;37(2):461-5. doi:10.1118/1.3276735
- 27) Altintas S. Monte Carlo calculations of beam quality correction factors k_Q for electron dosimetry with a parallel-plate Advanced Markus chamber. *Masterthesis, Universität Oldenburg.* 2009;
- 28) Zink K, Wulff J. Beam quality corrections for parallel-plate ion chambers in electron reference dosimetry. *Phys Med Biol.* Apr 7 2012;57(7):1831-54. doi:10.1088/0031-9155/57/7/1831
- 29) Aget H, Rosenwald JC. Polarity effect for various ionization chambers with multiple irradiation

- conditions in electron beams. *Medical physics*. 1991;18(1):67-72.
- 30) Pearce J, Thomas R, Dusautoy A. The characterization of the Advanced Markus ionization chamber for use in reference electron dosimetry in the UK. *Phys Med Biol*. Feb 7 2006;51(3):473-83. doi:10.1088/0031-9155/51/3/001
- 31) Boag J. Ionization chambers. *The dosimetry of ionizing radiation*. 1987;2:169-243.
- 32) Bass G, Thomas R, Pearce J. The calibration of parallel-plate electron ionization chambers at NPL for use with the IPEM 2003 code of practice: summary data. *Phys Med Biol*. Apr 21 2009;54(8):N115-24. doi:10.1088/0031-9155/54/8/N01
- 33) Burns DT, McEwen MR. Ion recombination corrections for the NACP parallel-plate chamber in a pulsed electron beam. *Phys Med Biol*. Aug 1998;43(8):2033-45. doi:10.1088/0031-9155/43/8/003
- 34) 吉田 毅. 電離箱の変遷とさまざまな線量計. *日本放射線技術学会雑誌*. 2006;62(12):1638-1643. doi:10.6009/jjrt.62.1638
- 35) Muir BR, McEwen MR, Rogers DW. Beam quality conversion factors for parallel-plate ionization chambers in MV photon beams. *Med Phys*. Mar 2012;39(3):1618-31. doi:10.1118/1.3687864
- 36) Kry S, Popple R, Molineu A, Followill D. Ion Recombination Correction Factors (Pion) for Varian TrueBeam High Dose Rate Therapy Beams. *Medical Physics*. 2012;39(6Part15):3790-3790. doi:10.1118/1.4735462
- 37) Burns DT, Ding GX, Rogers DWO. R_{50} as a beam quality specifier for selecting stopping-power ratios and reference depths for electron dosimetry. *Medical Physics*. 1996;23(3):383-388. doi:10.1118/1.597893
- 38) Laub WU, Crilly R. Clinical radiation therapy measurements with a new commercial synthetic single crystal diamond detector. *J Appl Clin Med Phys*. Nov 8 2014;15(6):4890. doi:10.1120/jacmp.v15i6.4890
- 39) Marinelli M, Prestopino G, Verona C, Verona-Rinati G. Experimental determination of the PTW

- 60019 microDiamond dosimeter active area and volume. *Med Phys.* Sep 2016;43(9):5205.
doi:10.1118/1.4961402
- 40) Muir BR, Rogers DW. Monte Carlo calculations for reference dosimetry of electron beams with the PTW Roos and NE2571 ion chambers. *Med Phys.* Dec 2013;40(12):121722.
doi:10.1118/1.4829577
- 41) McEwen MR, DuSautoy AR, Williams AJ. The calibration of therapy level electron beam ionization chambers in terms of absorbed dose to water. *Phys Med Biol.* Sep 1998;43(9):2503-19.
doi:10.1088/0031-9155/43/9/006
- 42) Kato H, Hayashi N, Kuroki R, Adachi Y, Suzuki S. [Presumption of the energy-spectrum of high-energy electron beam based on the beta-distribution model]. *Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi.* 2013/12// 2013;69(12):1387-1393. doi:10.6009/jjrt.2013_jsrt_69.12.1387
- 43) Rodrigues A, Sawkey D, Yin FF, Wu Q. A Monte Carlo simulation framework for electron beam dose calculations using Varian phase space files for TrueBeam Linacs. *Med Phys.* May 2015;42(5):2389-403. doi:10.1118/1.4916896
- 44) Chin E, Palmans H, Shipley D, Bailey M, Verhaegen F. Analysis of dose perturbation factors of a NACP-02 ionization chamber in clinical electron beams. *Phys Med Biol.* Jan 21 2009;54(2):307-26. doi:10.1088/0031-9155/54/2/009
- 45) Kawrakow I. On the effective point of measurement in megavoltage photon beams. *Med Phys.* Jun 2006;33(6):1829-39. doi:10.1118/1.2201147

☒



図 1.1 放射線線量計測で使用される円筒形電離箱（右）および平行平板形電離箱（左）





	X線		電子線
	絶対線量計測	相対線量計測	絶対・相対線量計測
円筒形	 幾何学的中心	 幾何学的中心から $0.6r$ 線源側へシフト	 幾何学的中心から $0.5r$ 線源側へシフト
平行平板形	X線では使用しない		 電離空洞前面中心

図 1.2 標準計測法 12 で規定されている電離箱タイプと線種の違いによる測定点の違い

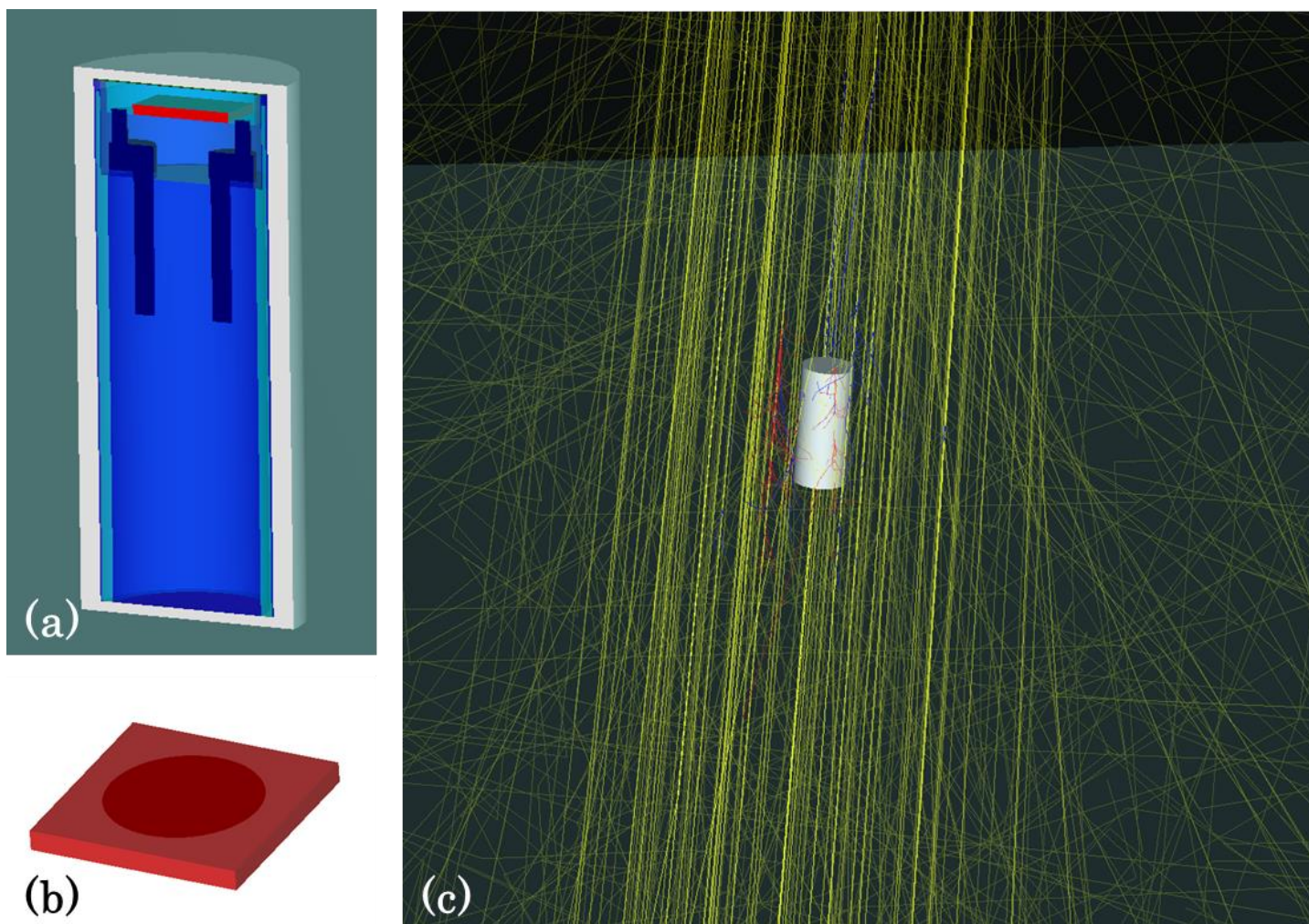


図 2.1 egs_chamber で再現した microDiamond 検出器および計算ジオメトリ。(a) egs_chamber で作成した microDiamond 検出器の断面、(b) 検出器内の Diamond 組織の部分（濃赤色が有感体積部分）、(c) OPF の計算を行ったときの microDiamond 検出器の配置。
電子線を用いたエネルギー依存性の検証についても(c)と同様のジオメトリを再現し検証を実施した。

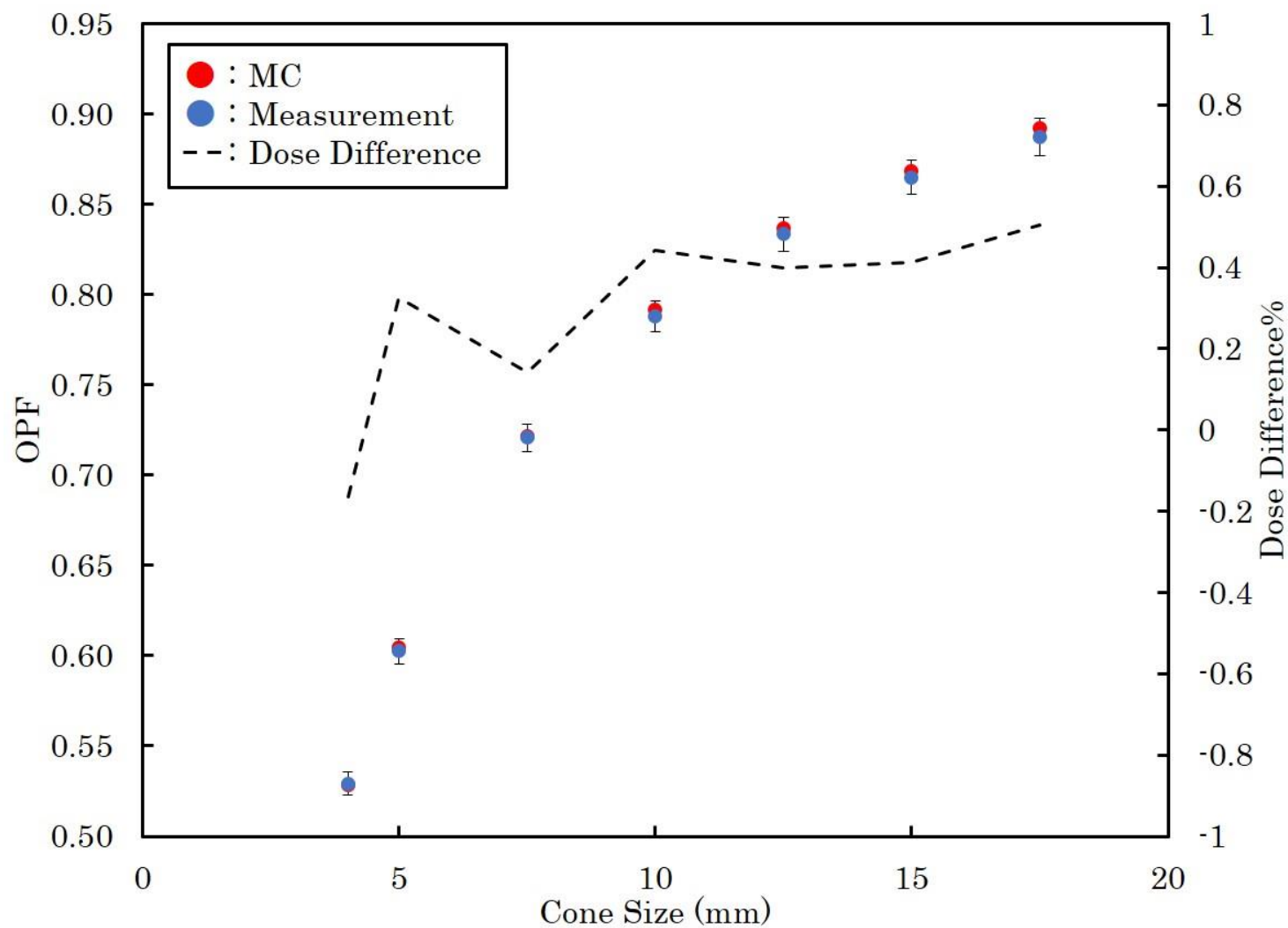


図 2.2 MC 計算および計測で決定した microDiamond 検出器の OPF。値は $5 \times 5 \text{ cm}^2$ で正規化した結果である。破線は OPF_{meas} を基準に算出した線量誤差%である。エラーバーは 1σ を示している。

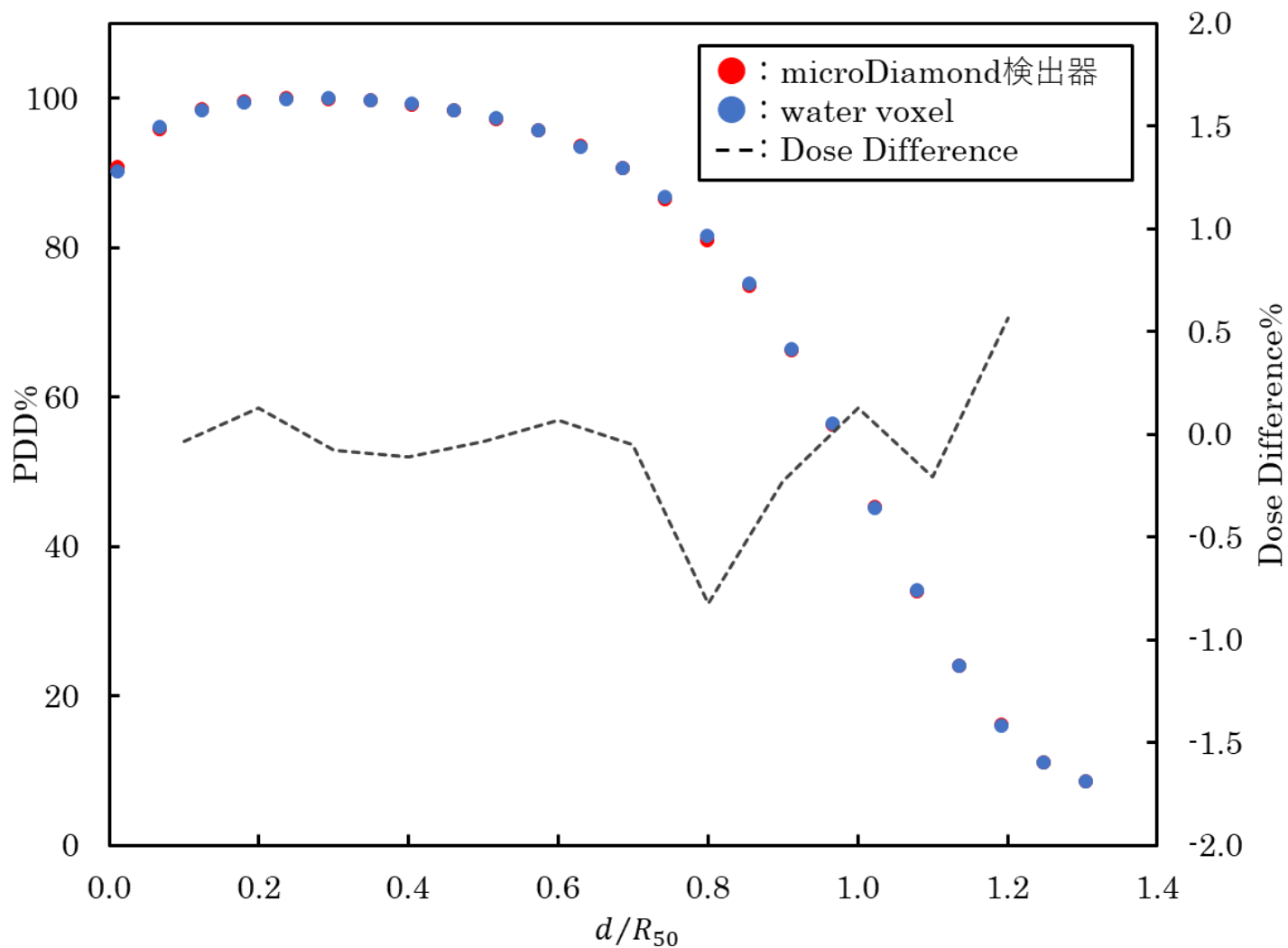


図 2.3 microDiaond 検出器のエネルギー依存性の検証。microDiamond 検出器は深い領域でも water voxel と同程度の PDD を取得できる。
統計的不確かさは各プロットサイズよりも小さい。

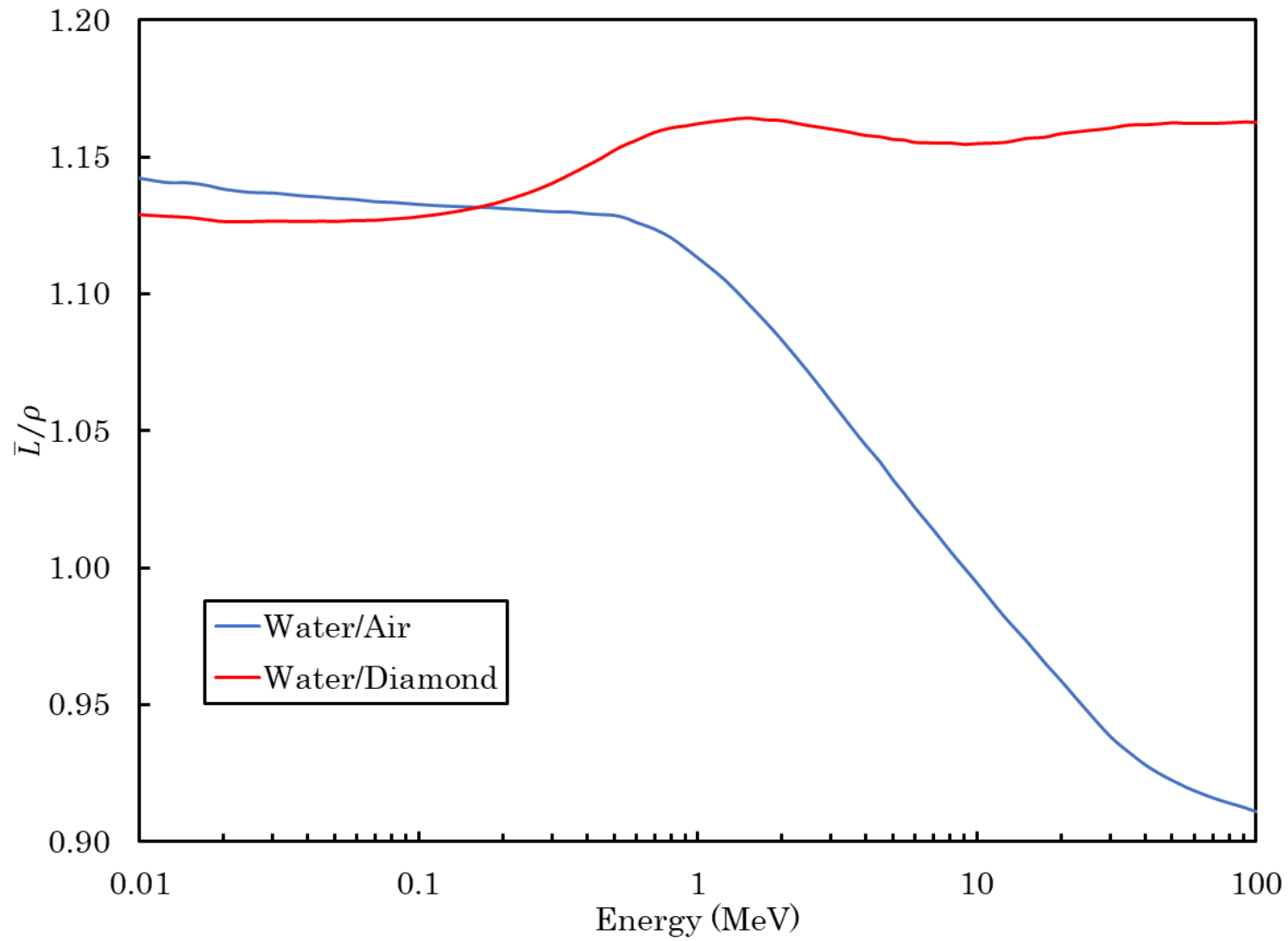


図 2.4 $(\bar{L}/\rho)_{w,air}$ および $(\bar{L}/\rho)_{w,Dia}$ のエネルギーによる変化の違い。microDiamond 検出器では阻止能の影響が小さい。

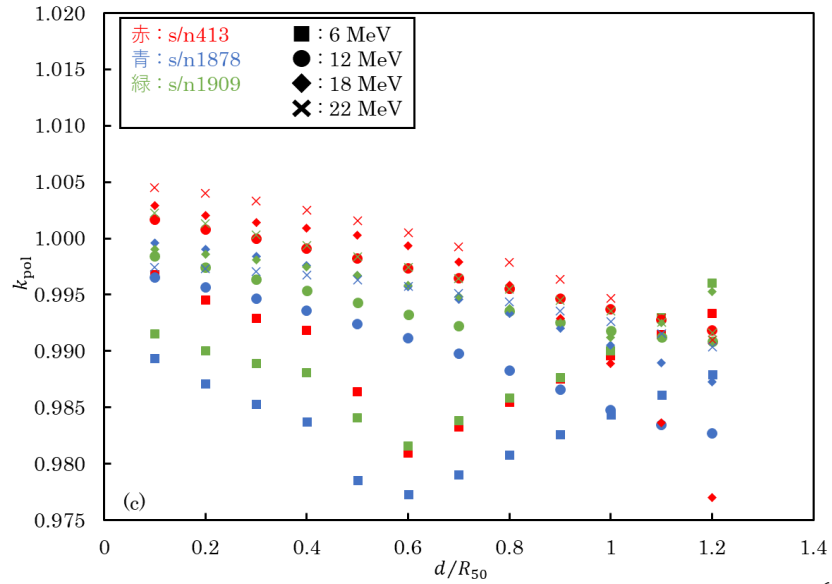
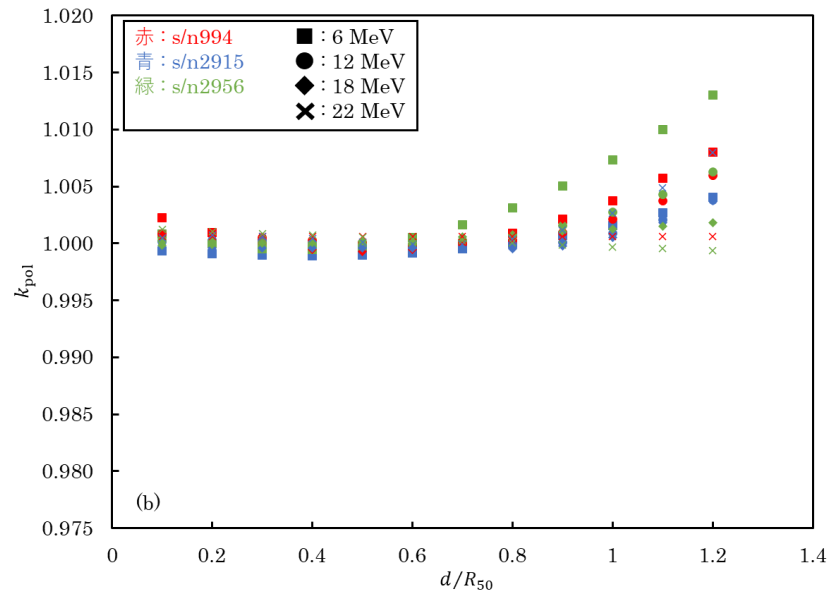
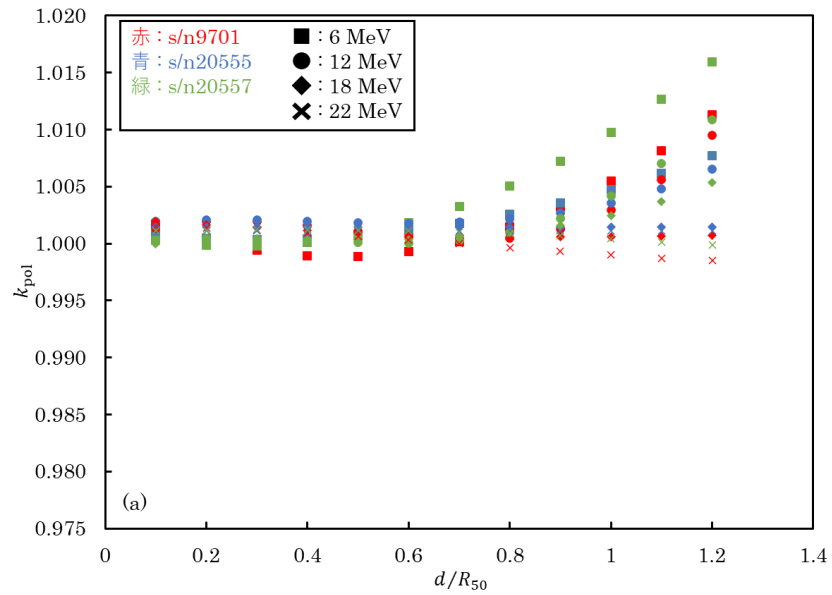


図 3.1 各電離箱タイプによる k_{pol} の深さ変化の違い
 (a)NACP-02、(b)Roos、(c)Advanced Markus
 NACP-02 および Roos については、値が上昇していく傾向に対し、Advanced Markus は低下していく傾向を示す。

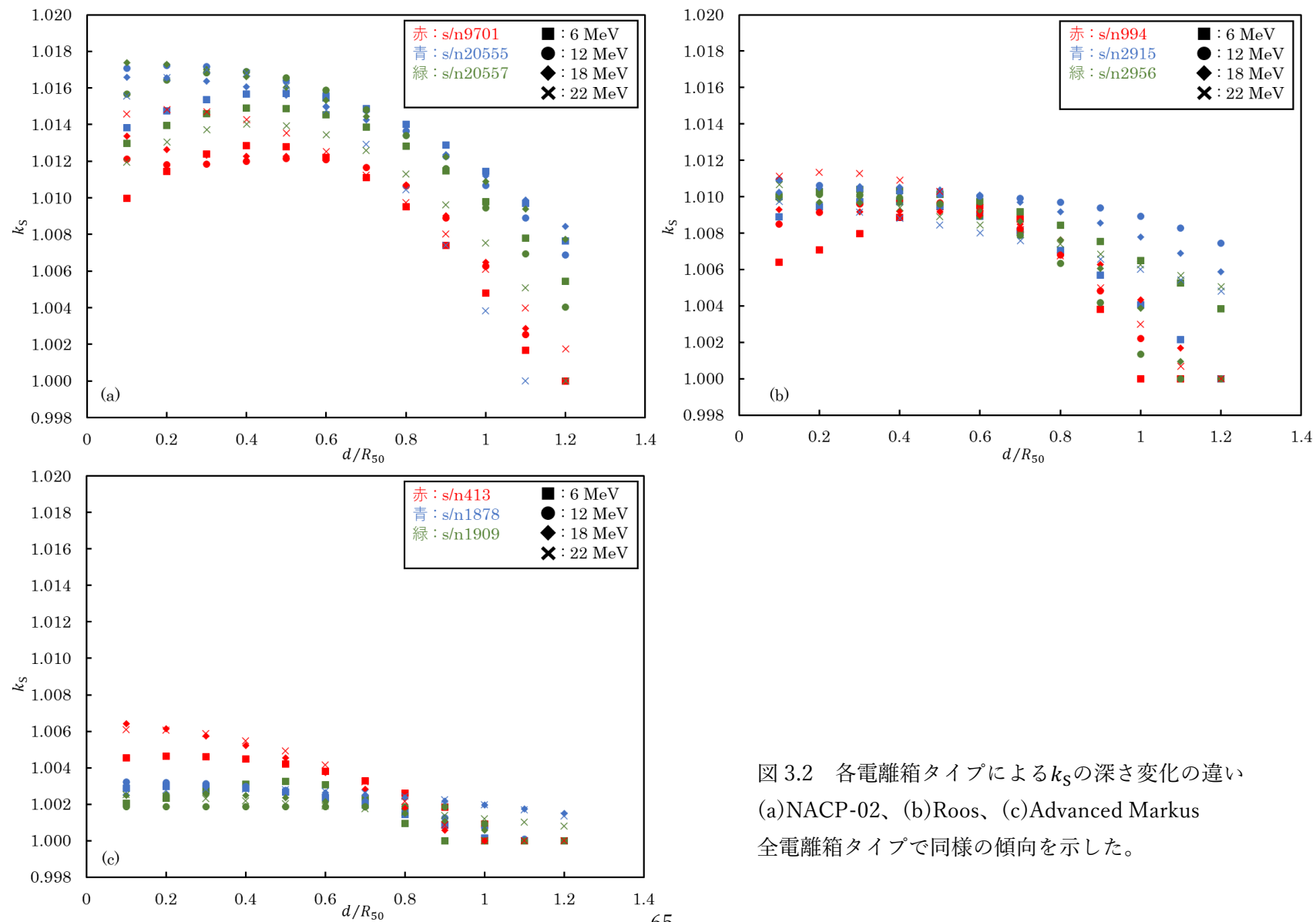


図 3.2 各電離箱タイプによる k_s の深さ変化の違い
 (a)NACP-02、(b)Roos、(c)Advanced Markus
 全電離箱タイプで同様の傾向を示した。

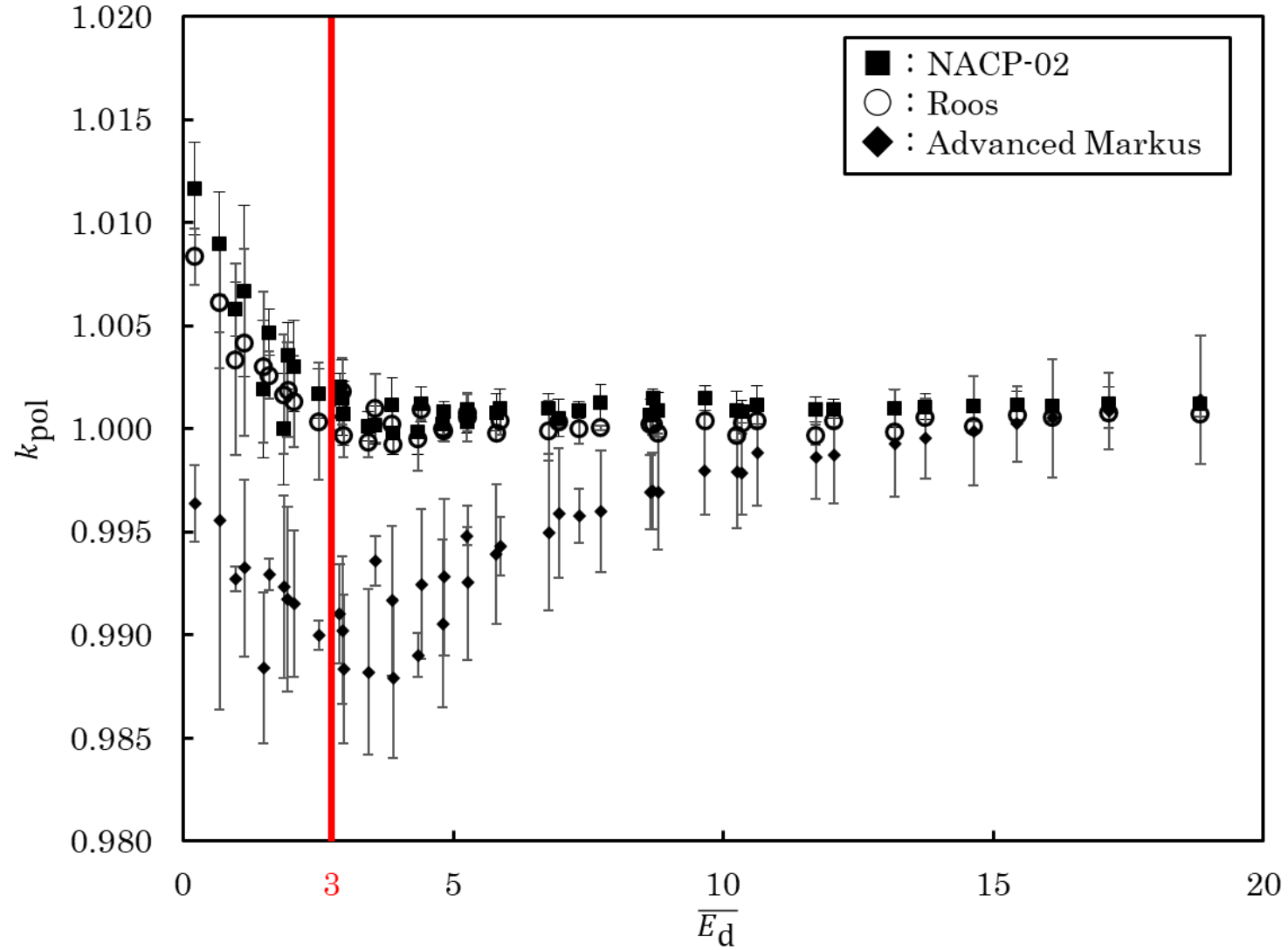


図 3.3 $\overline{E_d}$ に対する k_{pol} の変化。全シリアルナンバーの結果を包含し電離箱タイプごとに示している。エラーバーは 1σ である。

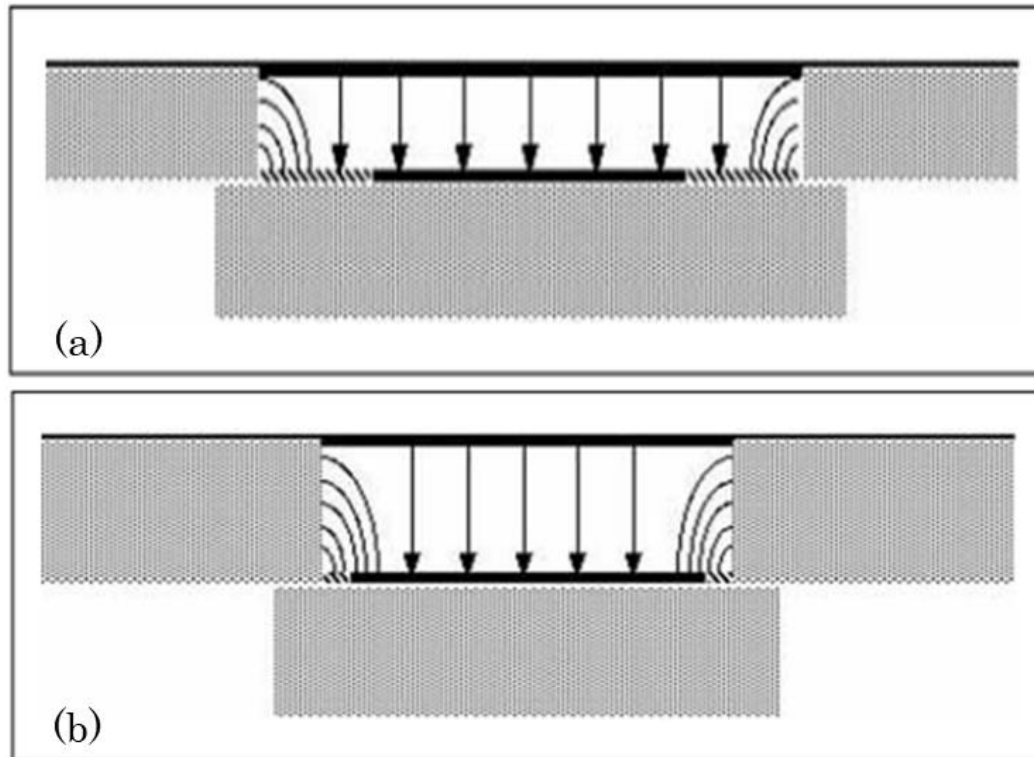


図 3.4 電離空洞内における収集電荷の流れ³⁴⁾。(a) 保護電極により十分に保護されている電離空洞、(b) 保護されていない電離空洞。
十分に保護されていない場合、側壁から発生した散乱電子が集電極へと引き寄せられ、電荷として収集されてしまう。

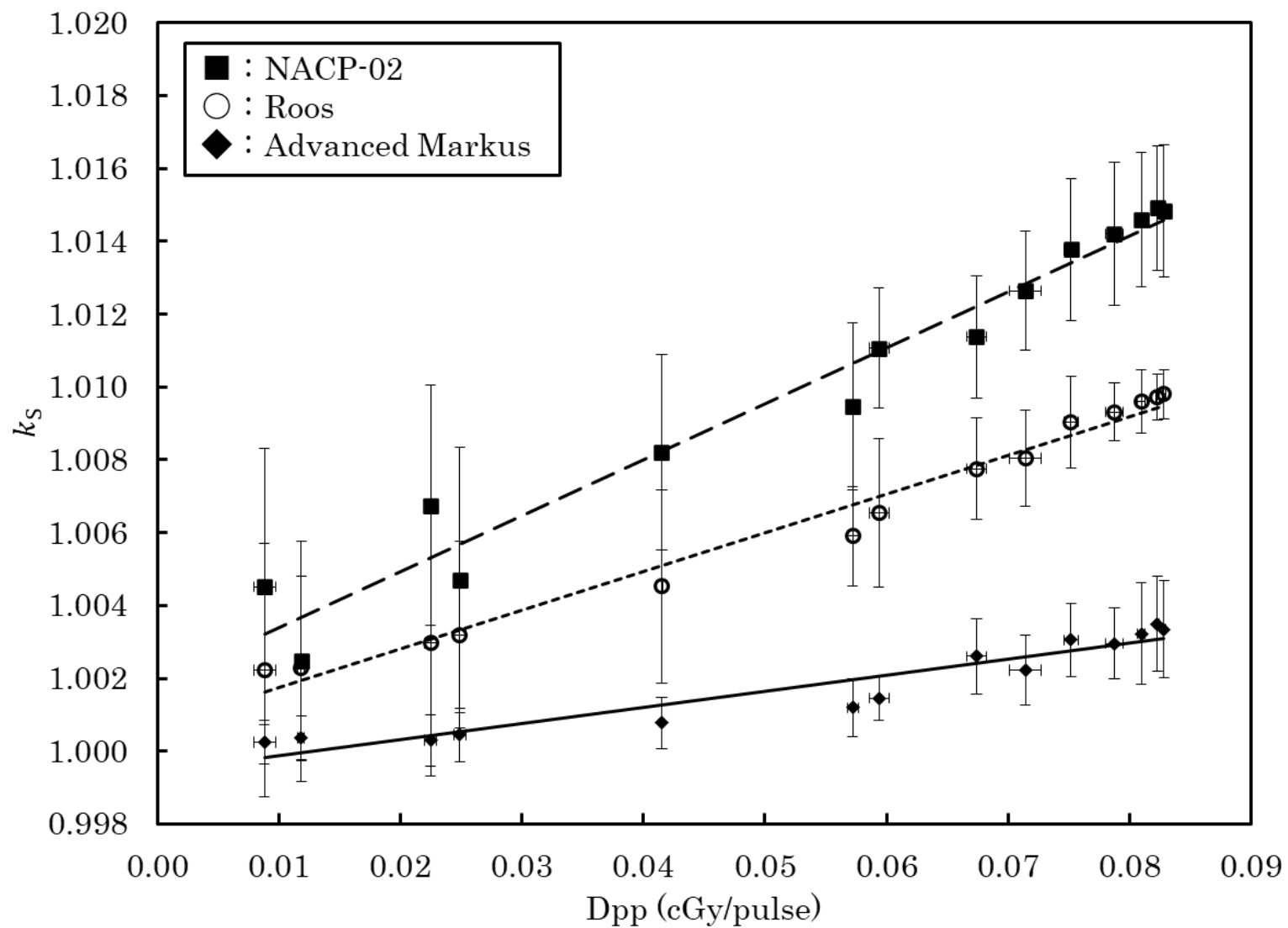


図 3.5 Dpp の変化に対する k_s の線形変化。エラーバーは 1σ を示している。

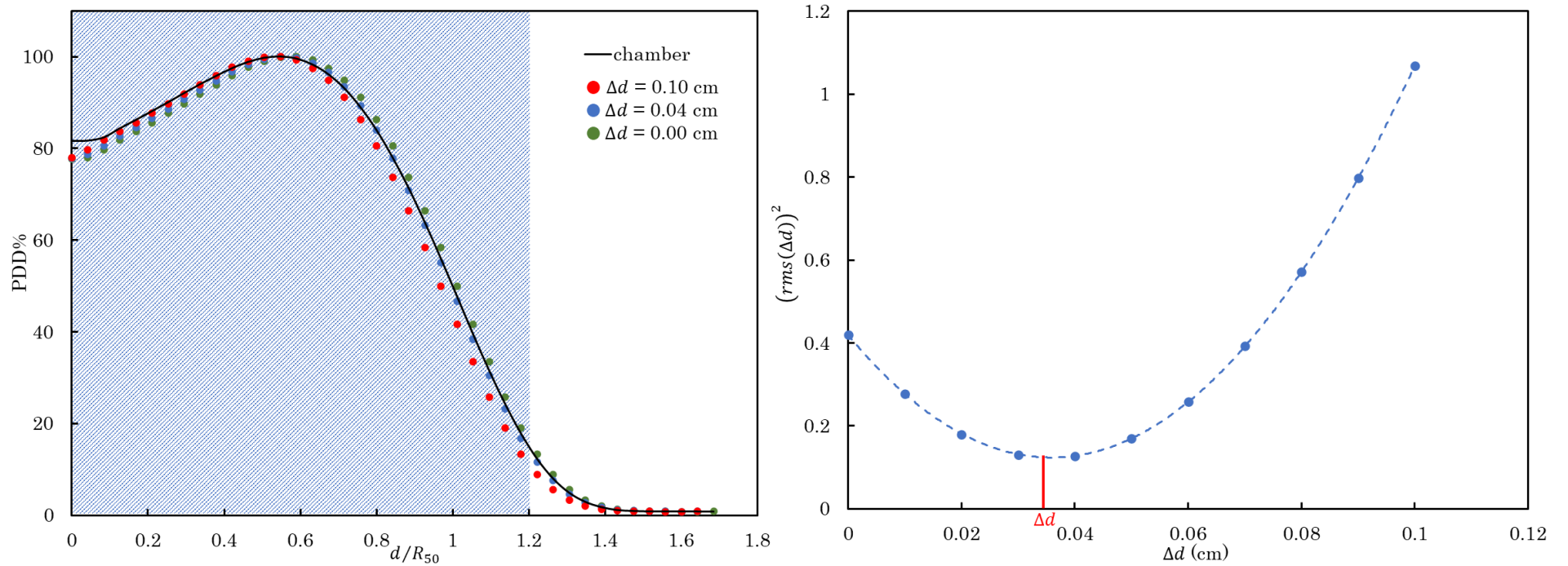


図 4.1 本研究における EPOM の決定方法。シフト Δd を適用させた microDiamond 検出器の PDD を複数作成し (左図●印)、各 Δd の PDD から $(rms(\Delta d))^2$ を決定しプロットする。そして二次近似曲線の最小値となる Δd (右図赤字) が電離空洞内前面中心から EPOM までの最適なシフトとなる。

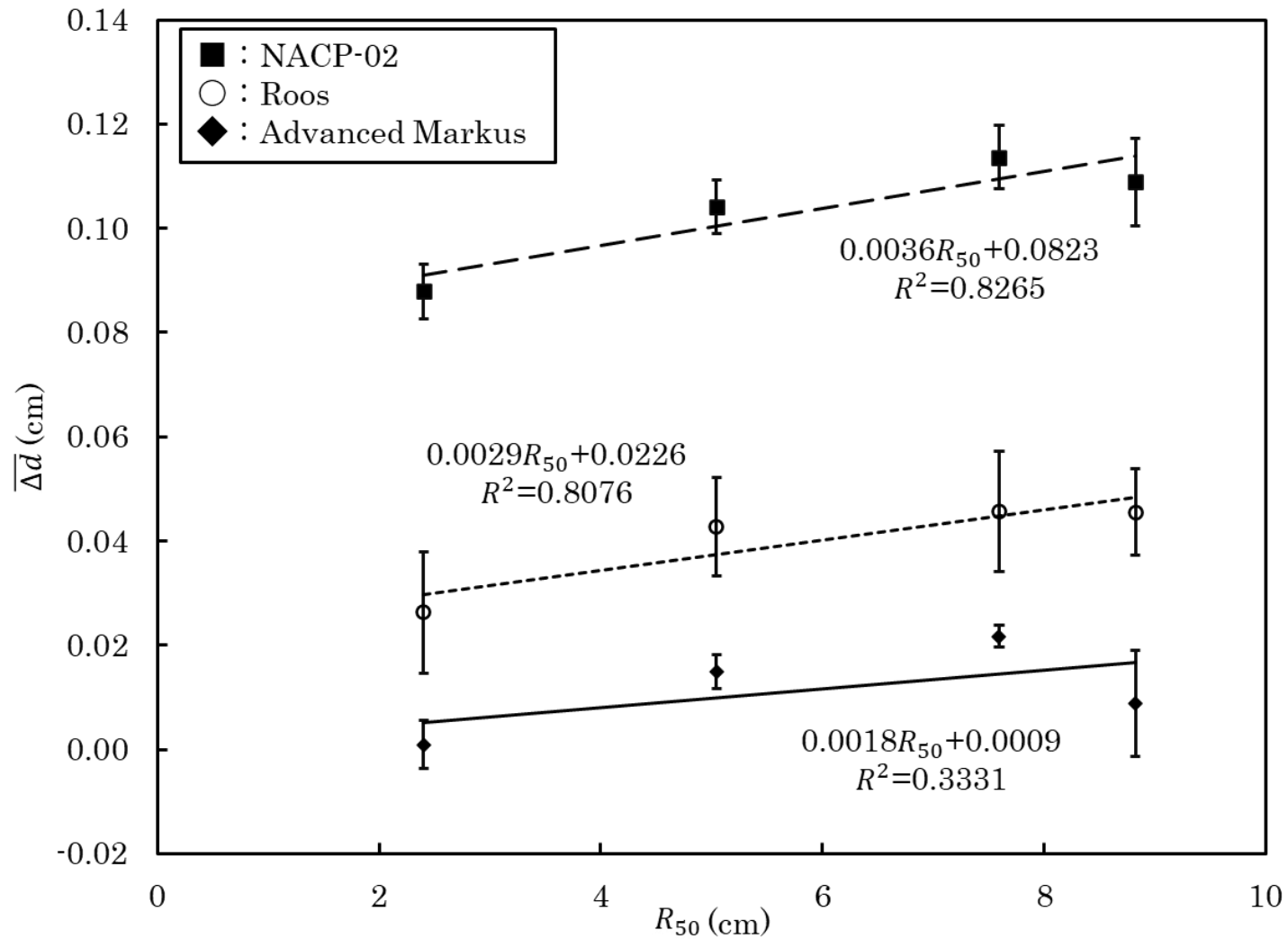


図 4.2 R_{50} に対する最適な Δd の変化。3つのシリアルナンバーから決定された値の平均値をプロットしている。エラーバーは複数回測定から算出された 1σ である。

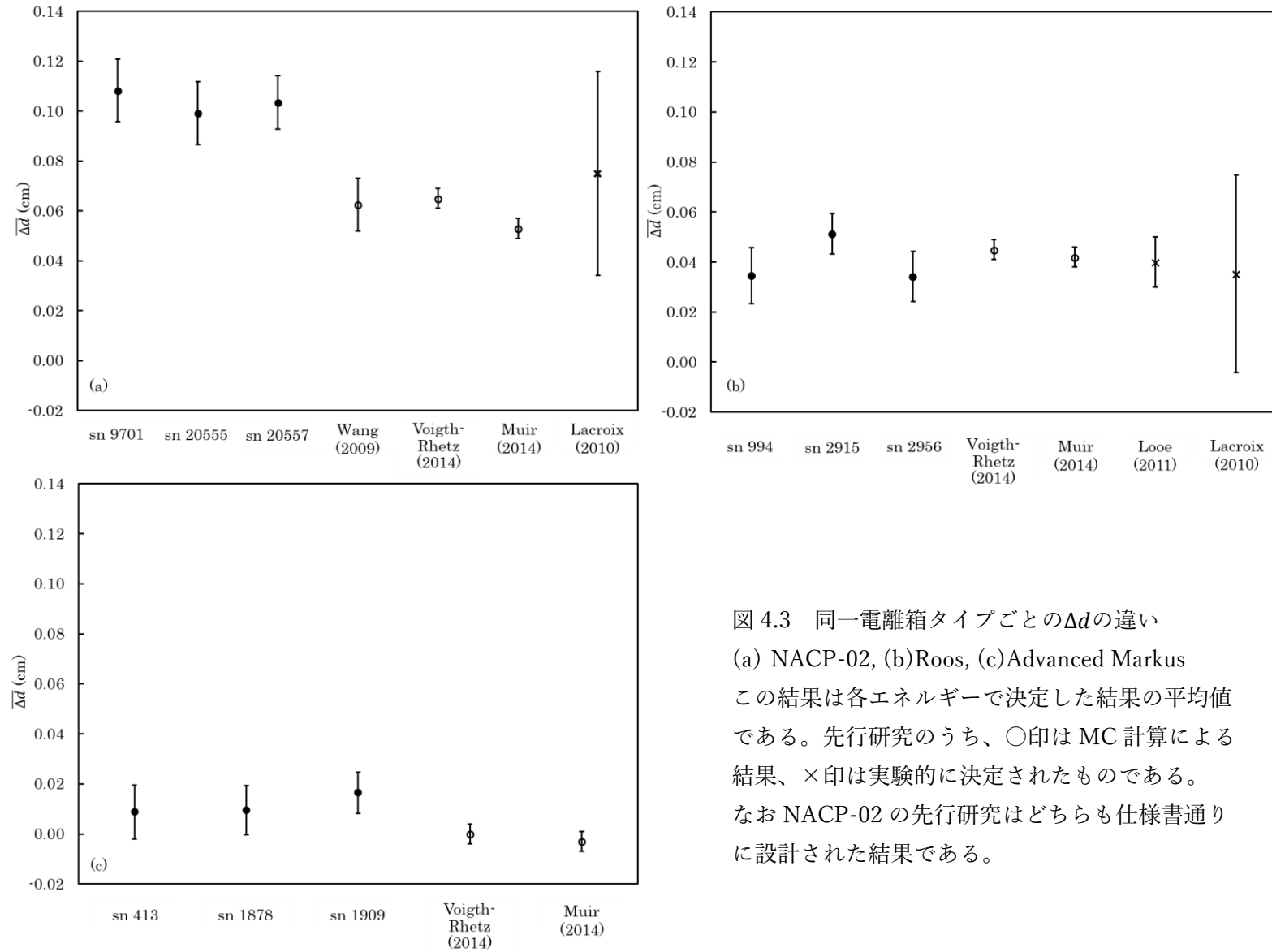


図 4.3 同一電離箱タイプごとの Δd の違い
 (a) NACP-02, (b)Roos, (c)Advanced Markus
 この結果は各エネルギーで決定した結果の平均値である。先行研究のうち、○印は MC 計算による結果、×印は実験的に決定されたものである。なお NACP-02 の先行研究はどちらも仕様書通りに設計された結果である。

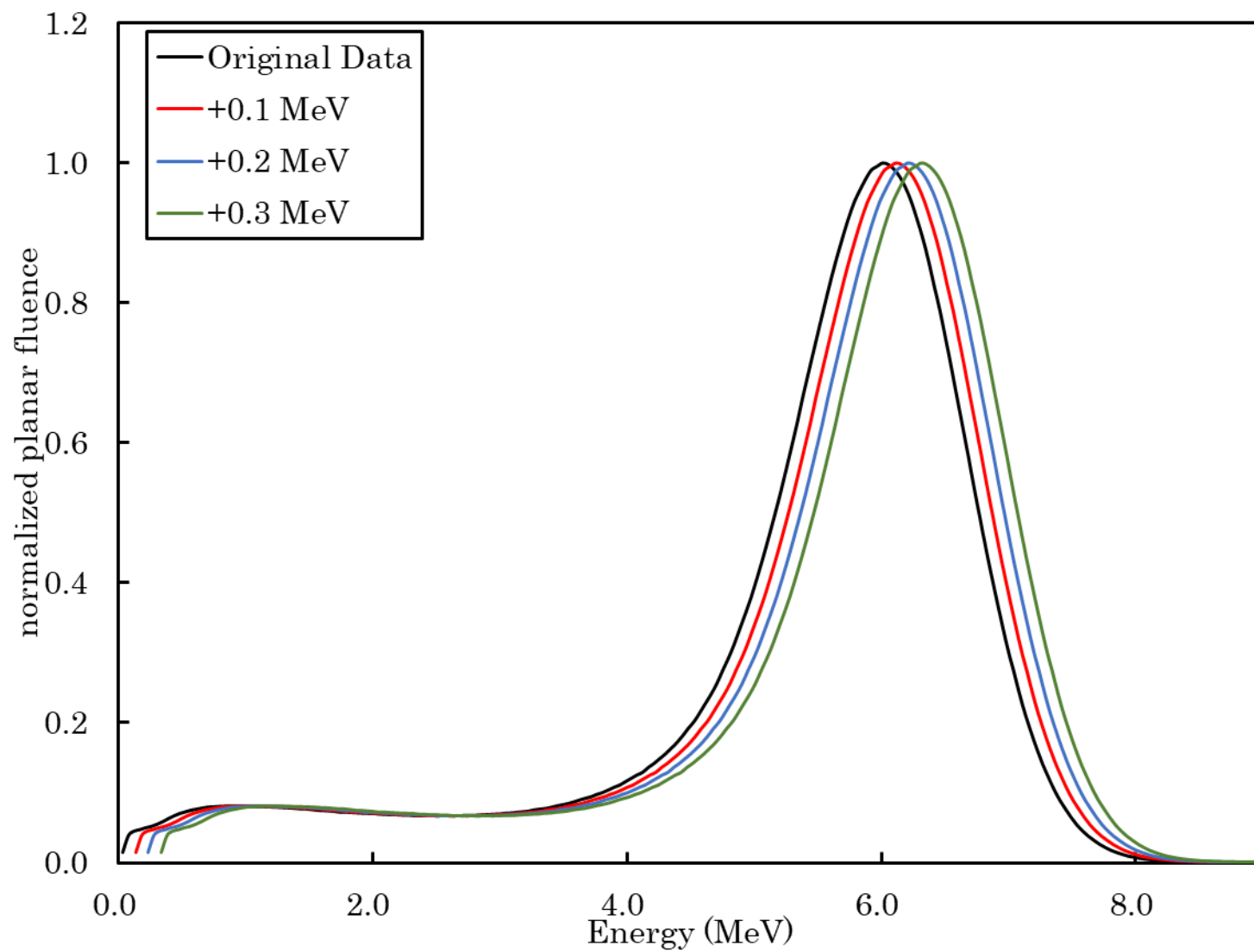
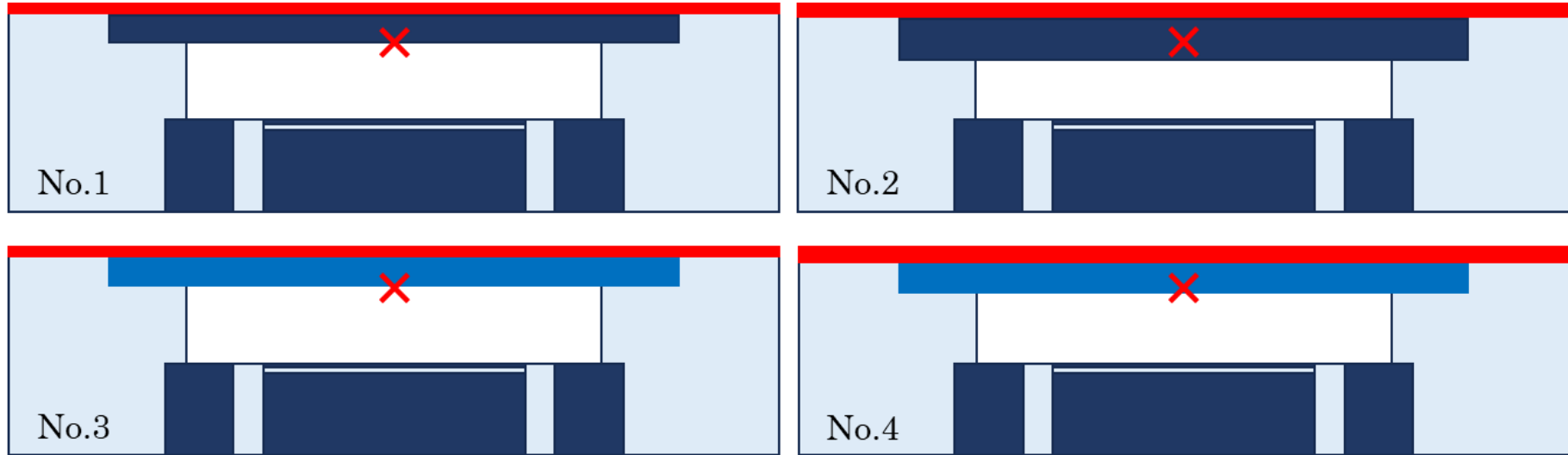


図 5.1 エネルギーの増加によるエネルギースペクトルの変化。Original Data におけるピークは 6.0 MeV に位置する。



Mylar, Graphite (1.75 g/cm³), Graphite (2.25 g/cm³)

図 5.2 作成した NACP-02 仮想電離箱モデルの入射窓の違い。赤は Mylar 層、紺と青はどちらも Graphite 層(1.75、2.25 g/cm³)である。入射窓の厚さを増加させただけ空洞の幅を小さくしている。したがって電離箱全体の厚さは全て同じである。×印は電離箱表面から 0.06 cm 下縁の点であり MC 計算で基準点に設定した位置である。

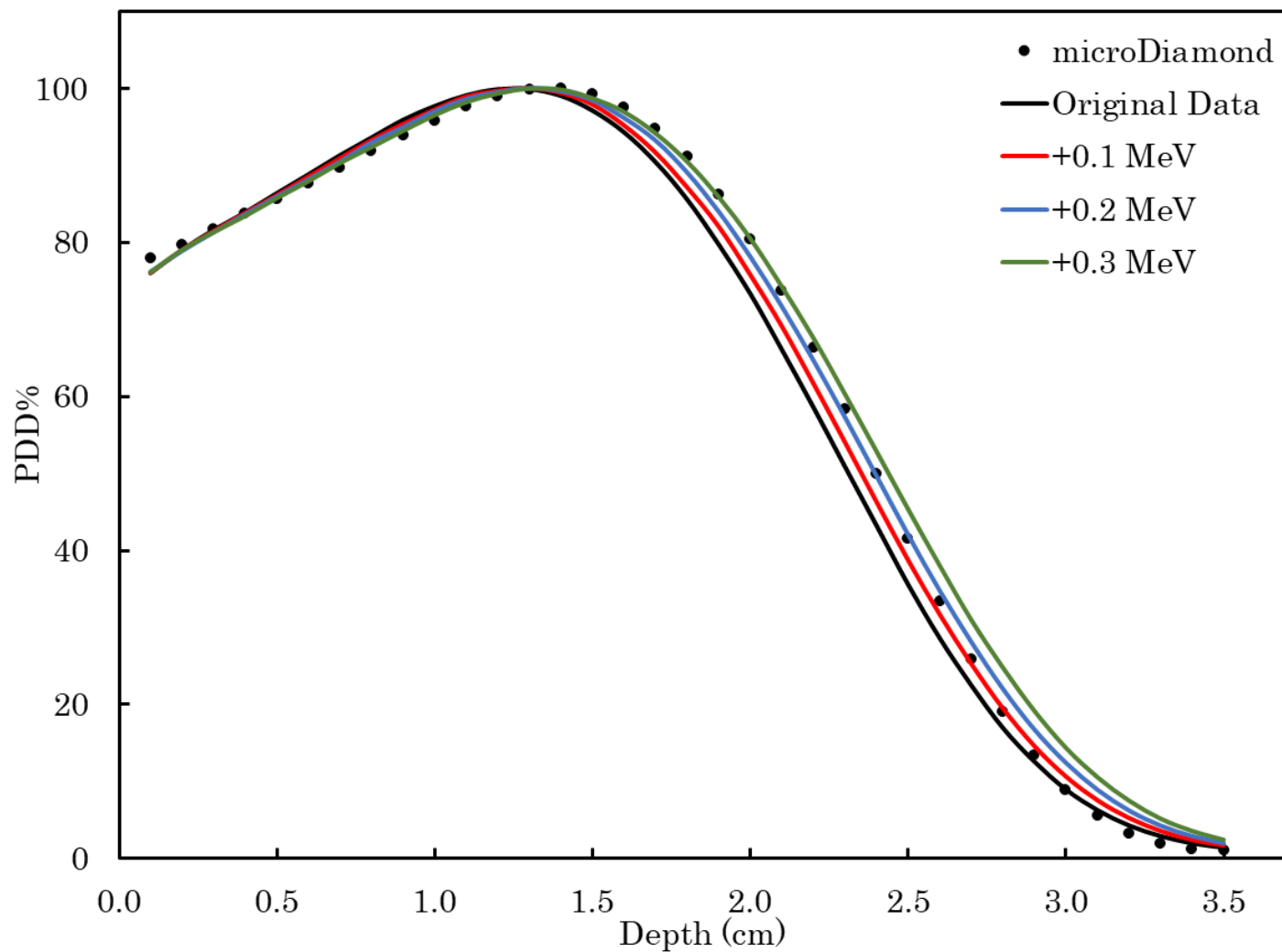


図 5.3 加速器から取得した microDiamond 検出器の PDD (●) と MC 計算でエネルギーを増加させた water voxel の PDD (-)。線量降下領域の高線量域では+0.3, +0.2 MeV が一致するが、低線量域では+0.1 MeV, Original Data が良好な一致を示す。

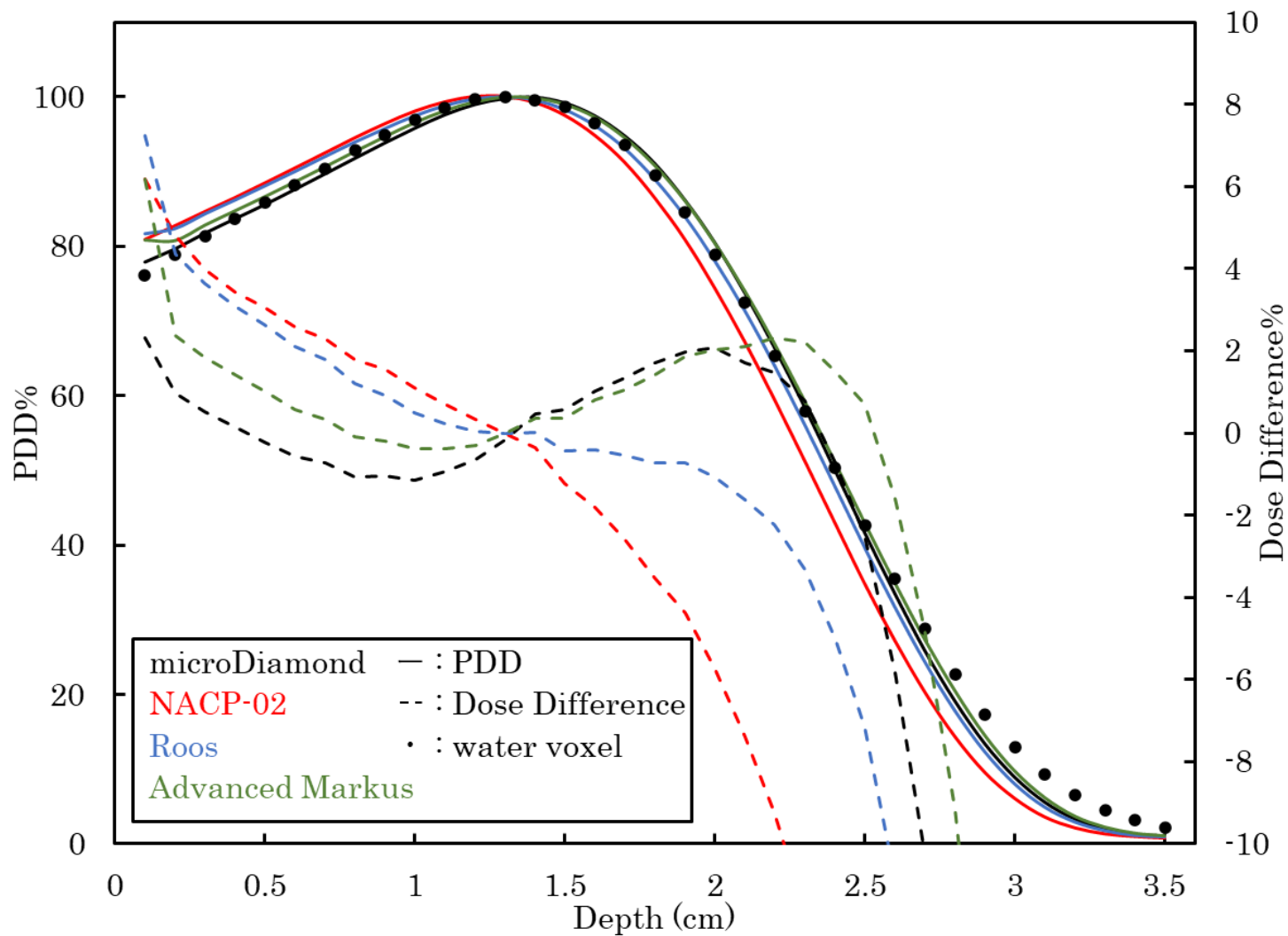


図 5.4 加速器から取得した各検出器の PDD (—) と +0.20 MeV 増加させ MC 計算で取得した water voxel の PDD (●)。water voxel との一致度は microDiamond = Advanced Markus > Roos > NACP-02 であり、Advanced Markus は microDiamond 検出器と同等の結果を示す。

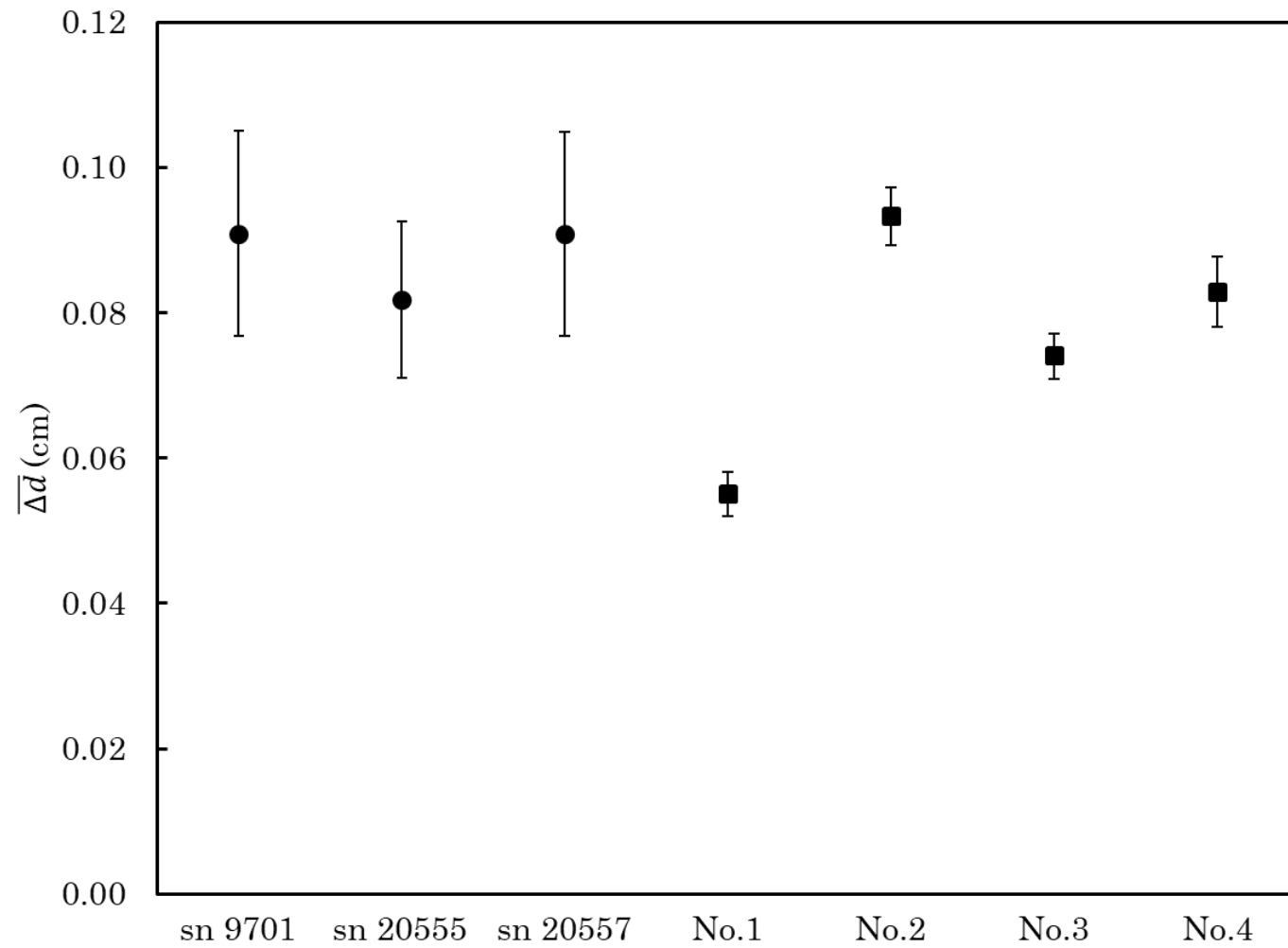


図 5.5 6 MeV において実験的に決定した Δd (●) と、MC 計算により決定した各 NACP-02 仮想電離箱モデルの Δd (■)。全プロットが電離箱表面より 0.06 cm 下縁の点を基準として決定した Δd である。エラーバーは Kawrakow ら⁴⁵⁾に基づいて統計的不確かさを 1σ として示している。

表

表 1.1 平行平板形電離箱の EPOM シフトの報告値

先行研究	EPOM までのシフト (cm)			算出方法
	NACP-02	Roos	Advanced Markus	
Wang ¹²⁾ (2009)	0.060	—	—	MC
Zink ¹³⁾ (2009)	—	0.040	—	MC
Ono ¹⁴⁾ (2011)	0.055	0.024	—	MC
Muir ¹⁵⁾ (2014)	0.053	0.042	-0.003	MC
Voigts-Rhetz ¹⁶⁾ (2014)	0.065	0.045	0.000	MC
Lacroix ¹⁷⁾ (2010)	0.075	0.037	—	Experimental
Looe ¹⁸⁾ (2011)	—	0.040	—	Experimental

MC: Monte Carlo

表 2.1 microDiamond 検出器モデルの再現性確認に使用したシミュレーションパラメータ

Item name	Description
Code	EGSnrc
Source	Phase space file (TrueBeam (6 MV-FF))
Cross-section	PEGS4
Transport parameters	PCUT = 0.010 MeV ECUT = 0.521 MeV
Scored quantities	Dose deposition in microDiamond
Histories	2×10^9
Postprocessing	None

表 2.2 microDiamond 検出器のエネルギー依存性確認のためのシミュレーションパラメータ

Parameter	Value
Code	EGSnrc
Source	Phase space file (TrueBeam (22 MeV))
Cross-section	PEGS4
Transport parameters	PCUT = 0.010 MeV ECUT = 0.521 MeV
Scored quantities	Dose deposition in microDiamond and water voxel
Histories	2×10^{11}
Postprocessing	None

表 3.1 本研究で使用した検出器の構造


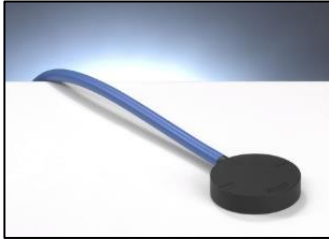

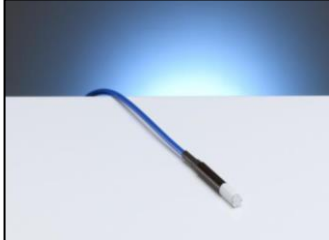
検出器	NACP-02	Roos (PTW34001)	Advanced Markus (PTW34045)	microDiamond (PTW60019)
s/n	1. 9701 2. 20555 3. 20557	1. 994 2. 2915 3. 2956	1. 413 2. 1878 3. 1909	123214
外観				
印加電圧 (V)	200	200	300	0
有感体積 (cm ³)	0.160	0.350	0.020	0.004 (mm ³)
集電極半径 (cm)	0.500	0.800	0.250	—
空洞半径 (cm)	0.800	1.200	0.450	—
電極間隔 (cm)	0.200	0.200	0.100	—
保護電極 (cm)	0.300	0.400	0.200	—
入射窓 (cm)	0.060	0.112	0.130	—
(g/cm ²)	0.104	0.118	0.106	—

表 3.2 イオン再結合補正係数の計算に用いる係数

V_1/V_2	パルス放射線			パルススキャン放射線		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
2.0	2.337	-3.636	2.299	4.711	-8.242	4.533
2.5	1.474	-1.587	1.114	2.719	-3.977	2.261
3.0	1.198	-0.875	0.677	2.001	-2.402	1.404
3.5	1.080	-0.542	0.463	1.665	-1.647	0.984
4.0	1.022	-0.363	0.341	1.468	-1.200	0.734
5.0	0.975	-0.188	0.214	1.279	-0.750	0.474

表 3.3 NACP-02 および Roos において 3 MeV 以上の測定点で取得した k_{pol} の平均値

電離箱	s/n	k_{pol}	Average
NACP-02	9701	1.0007 ± 0.0009	
	20555	1.0013 ± 0.0005	1.0009 ± 0.0007
	20557	1.0006 ± 0.0005	
Roos	994	1.0005 ± 0.0007	
	2915	0.9999 ± 0.0007	1.0002 ± 0.0007
	2956	1.0003 ± 0.0005	

表 5.1 ビームモデリングを実施する際に設定したシミュレーションパラメータ

Parameter	Value
Code	EGSnrc
Source	Phase space file (TrueBeam (6 MeV))
Cross-section	PEGS4
Transport parameters	PCUT=0.010 MeV ECUT=0.521 MeV
Scored quantities	Dose deposition in water voxel
Histories	1×10^{10}
Postprocessing	None

表 5.2 egs_chamber により再現した各 NACP-02 の仮想モデル

Model	Reference	入射窓 (cm)	Graphite 層 (cm)	Graphite 密度 (g/cm ³)	Mylar 層 (cm)
No.1	specification	0.060	0.050	1.75	0.010
No.2	Wang ¹²⁾	0.090	0.075	1.75	0.015
No.3	Muir ¹⁵⁾	0.060	0.050	2.25	0.010
No.4	Chin ¹⁹⁾	0.067	0.050	2.25	0.017

表 5.3 NACP-02 の入射窓の不確かさを検証するために使用したシミュレーションパラメータ

Parameter	Value
Code	EGSnrc
Source	Phase space file (TrueBeam (6 MeV))
Cross-section	PEGS4
Transport parameters	PCUT=0.010 MeV ECUT=0.521 MeV
Scored quantities	Dose deposition in chamber active volume
Histories	1×10^{10}
Postprocessing	None

表 5.4 入射エネルギーの増加に対する R_{50} の変化

+ E (MeV)	R_{50}
0.00	2.31
0.10	2.35
0.20	2.40
0.30	2.44
microDiamond	2.40

謝辞

本稿を終えるにあたり、御指導御鞭撻を賜りました駒澤大学大学院 医療健康科学研究科 藤田幸男 准教授、同、中島祐二郎 講師に深く感謝申し上げます。論文の書き方、文章構成、研究成果の示し方など懇切丁寧にご指導いただきました。深く御礼申し上げます。

佐藤昌憲 教授には学部生時代からお世話になりました。佐藤研究室での御指導があったからこそ、修士・博士課程への進学を決断することができました。心より御礼申し上げます。

修士課程まで指導教員であり 2021 年に御退官されました、保科正夫 教授には放射線計測の基礎をはじめ、研究への取り組み方など様々な御指導を賜りました。線量計測の研究に没頭できたのは保科教授の御指導によるものです。厚く御礼申し上げます。

最後に、博士課程で勉学に励む中、御指導御支援賜りました全ての方にこの場を借りて御礼申し上げます。