

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19591460  
 研究課題名(和文)放射線治療における水等価固体ファントムを用いた吸収線量測定法の確立

研究課題名(英文) Absorbed dose to water reference dosimetry using plastic water-equivalent phantoms in radiotherapy

研究代表者  
 荒木 不次男 (ARAKI FUJIO)  
 熊本大学・医学部・教授  
 研究者番号：00295148

研究成果の概要：強度変調放射線照射等の高精度三次元放射線治療の線量検証及び日常の治療線量の精度管理(品質管理・品質保証)のために、水等価固体ファントムに対する物理データ(質量衝突阻止能比, 質量エネルギー吸収係数比, 電離量変換係数等)をモンテカルロ(MC)計算から算出し、水等価固体ファントムを用いた水吸収線量の測定法を確立した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学

キーワード：水等価固体ファントム, 深さスケール係数, 電離量変換係数, モンテカルロ計算, 吸収線量測定プロトコル

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年, コンピュータ技術の発展にともない, 三次元原体照射法(3D-conformal radiation therapy, 3D-CRT)を用いた定位放射線治療(Stereotactic radiotherapy, SRT), あるいは強度変調放射線治療(Intensity-modulated radiation therapy, IMRT)等のような高精度三次元放射線治療が普及してきている。これらの高精度放射線治療が安全, かつ正確に実現されるためには, 放射線治療計画装置(Radiotherapy treatment planning system, RTPS)の計画線量(投与線量と線量分布)の計算精度が治療前に検証され, 保証されておく必要がある。

また, 日常の放射線治療線量の精度管理(品質管理・品質保証)が, 許容できる精度で確保されていない。

(2) 一般に, 高精度三次元放射線治療の計画線量の検証は, 水等価固体ファントム(以下, 固体ファントム)と検出器の組合せで行われる。しかし, 放射線治療線量は我が国も含め, 国際的に水の吸収線量を基準に決められている。固体ファントムは, 水に比べ取扱いが簡便であるが, 本質的に水物質と化学組成や物理的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )が異なるため, 線量特性が異なる点が問題となる。現在, 水に類似した吸収及び散乱特性を示す種々の化学組成

を持った水に近い密度のものが市販されているが、固体ファントムに対する国際的に統一された線量測定プロトコルは未だ定められていない。この理由は、1つには放射線治療量が水吸収線量を基準に決められている、もう1つは種々の固体ファントムを用いた線量評価に関する詳細な物理データ（質量衝突阻止能比、質量エネルギー吸収係数比等）が十分整備されていない点にある。固体ファントムに対する物理データは、測定による評価が困難で、基本的にはモンテカルロ法等のシミュレーションによって評価される。

(3) 現在、高精度放射線治療等の固体ファントムを用いた線量検証においては、水と固体ファントムの直接的な比較測定によって得られた変換（換算）係数を用いて、吸収線量の評価を行っている。この比較測定では、使用する放射線の種類やエネルギー、あるいは種々の照射条件によってそれぞれ測定する必要があり、非常に煩雑で測定者の技術に依存するため客観性に乏しい。一方、日常の放射線治療装置の線量管理においても、水ファントムを頻繁に使用するのは大変煩雑で、定期的な線量測定以外の日々の線量管理は、固体ファントムを使用するのが簡便で実用的な方法である。

(4) 研究代表者は、これまでモンテカルロ法による放射線治療線量の評価に関する研究を行ってきた。とくに、リニアック装置のシミュレーションと定位放射線治療で用いられる小照射野の光子線の線量特性の研究に、モンテカルロ法による評価を導入した。このような経験と前述の背景から、固体ファントムに対する物理データをモンテカルロ法によって計算し、“固体ファントムを用いた吸収線量測定法”の確立の着想に至った。現在、米国医学物理学会（AAPM）では課題研究グループによって、固体ファントムを用いた線量測定プロトコルの構築に対する準備が進められている。本研究代表者は AAPM に先んじて、国内外で使用されている固体ファントムについて、簡便で精度良い吸収線量測定法の確立を目指している。本吸収線量測定法は、日常の放射線治療線量の精度管理（品質管理・品質保証）においても有用であり、これによって、放射線治療従事者の利便性と放射線治療を受ける患者の安全性を保證することが可能となる。

## 2. 研究の目的

高精度三次元放射線治療の線量検証、及び日常の放射線治療線量の精度管理（品質管理・品質保証）のために、水等価固体ファントムに対する物理データ（質量衝突阻止能比、質量エネルギー吸収係数比等）をモンテカル

ロ計算によって整備し、“水等価固体ファントムを用いた吸収線量測定法”を確立する。

本研究では、次の事項を明らかにする。

(1) 臨床で使用されている放射線治療装置（リニアック）の照射ヘッドの幾何学的構造と材質等を正確にモンテカルロ法によってシミュレーションし、放射線治療で用いられる代表的な光子線と電子線のエネルギーについて、測定された実際のビームデータと一致するような最適なシミュレーションモデルを構築する。

(2) 構築されたシミュレーションモデルを用いて、現在、我が国で使用されている代表的な水等価固体ファントム（Solid water RMI457, Tough water WE211, RW3, MixDP, Plastic water, Plastic water DT）の物理データとして、質量衝突阻止能比、質量エネルギー吸収係数比、各種の電離箱線量計と固体ファントムとの組み合わせにおける補正係数等をモンテカルロ法から計算する。

(3) 上記の物理データから光子線及び電子線における水と固体ファントムの物理特性の違いを解析し、水吸収線量を評価するのに必要な水と固体ファントムの電離量変換係数を算出する。

(4) 水と固体ファントムの基準測定条件における直接的な比較測定によって得られた電離量変換係数とモンテカルロ法によるものと比較し、モンテカルロ法の計算結果の妥当性を検証する。

(5) 臨床現場で簡便に使用できる固体ファントムを用いた吸収線量測定法を確立する。

## 3. 研究の方法

(1) 高エネルギー光子線における水と固体ファントムの電離量変換係数の評価

Fig. 1(A), (B)に水と固体ファントムを用いた吸収線量の測定手順を示す。(A)は現在確立されている水ファントムを用いた吸収線量の測定手順で、(B)は本研究で対象としている固体ファントムを用いた吸収線量の測定手順を示す。本研究では、赤枠で示すところが焦点となり、第1に線量評価点である固体ファントムの校正深（水等価深）を評価する。第2に校正深における水と固体ファントムの測定値の変換係数を評価する。これによって、固体ファントムを用いた吸収線量測定が可能となる。本年度は、高エネルギー光子線を対象に、固体ファントムにおける校正深の評価に必要な深さスケール係数  $c_{p1}$  と、固体から水ファントムへの電離量変換係数  $h_{p1}$  を算出し、固体ファントムを用いた水吸収線量の標準測定プロトコルを確立する。

本研究では、国内で使用されている6種類の固体ファントム (Solid water RMI457, Tough water WE211, RW3, MixDP, Plastic water, Plastic water DT) を対象とする。

### リニアック治療装置のX線照射ヘッドのモンテカルロシミュレーションとコミッション

本研究代表者はこれまでの研究において、リニアック治療装置の照射ヘッド (幾何学的構造と材質等) のモンテカルロシミュレーションと、測定ビームデータとのコミッションについては多くの論文を発表してきた。本研究では、臨床で使用されている4, 6, 10, 18 MVのX線エネルギーを対象にシミュレーションを行う。

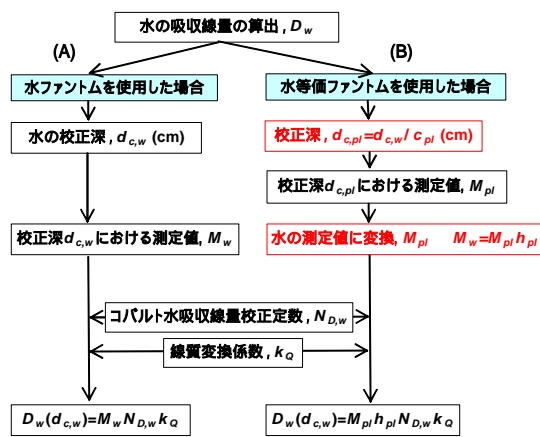


Fig.1. 水と固体ファントムを用いた吸収線量の測定手順の比較

### 固体ファントムの校正深の評価

各固体ファントムの校正深 (水等価深 10 cm) は、前述のX線エネルギーについて、水ファントムに対する各固体ファントムの深さスケール係数  $c_{pl}$  から求める。 $c_{pl}$  は各固体ファントムの化学組成とその重量比及び物理的密度 ( $g/cm^3$ ) をもとに、モンテカルロ法で計算した種々の物理データから算出し、固体ファントムの電子密度計算や測定実験による  $c_{pl}$  と比較する。

### 固体ファントムから水ファントムへの電離量変換係数 $h_{pl}$ の算出

電離量変換係数  $h_{pl}$  は、Fig. 1(B) に示すように、測定においては校正深での水と固体ファントムの測定値の比から得られる。計算においては、モンテカルロ計算から求めた物理データ (水と固体ファントム、及び電離箱壁材の質量衝突阻止能比や質量エネルギー吸収係数比等) を用いて算出される。したがって、モンテカルロ法では各種の電離箱線量計と固体ファントムの組み合わせに対して  $h_{pl}$

を算出することが可能である。本研究では、基準測定条件での測定値と計算値の比較・検証を行い、計算値の妥当性を検証する。

### (2) 高エネルギー電子線における水と固体ファントム電離量変換係数の評価

X線と同様に電子線についても、Fig. 1(B) にしたがって固体ファントム (Solid water RMI457, Tough water WE211, RW3, MixDP, Plastic water, Plastic water DT) による吸収線量を評価する。電子線については、吸収線量測定プロトコルで固体ファントムの使用が認められているが、線量評価のための十分な物理データ (質量衝突阻止能比) は提供されていない。本研究では、電子線について固体ファントムの標準的な物理データと校正深の評価に必要な深さスケール係数  $c_{pl}$ 、及び固体から水ファントムへの電離量変換係数 (フルエンススケール係数)  $h_{pl}$  を算出する。

### リニアック治療装置の電子線照射ヘッドのモンテカルロシミュレーションとコミッション

電子線については、臨床で使用されている4, 6, 9, 15, 18 MeVのエネルギーを対象に、照射ヘッドの幾何学的構造と材質等のシミュレーションを行う。

その他は、基本的には光子線と同じ研究手順にしたがって行う。また、電子線の吸収線量測定における現測定プロトコルでは、平行平板形電離箱線量計が推奨されているが、電離箱壁 (全周壁) と水あるいは固体ファントムの材質の違いに対する補正係数 ( $P_{wall}$ ) が考慮されていない。本研究では、電子線における追加研究としてこの補正係数についてもモンテカルロ計算から評価する。

### 固体ファントムを用いた吸収線量測定法の確立

前述までの研究結果をもとに、Fig. 1(B) の手順にしたがって各種の固体ファントムを用いた吸収線量測定法を確立する。

### 4. 研究成果

#### 高エネルギー光子線・電子線における水と固体ファントムの電離量変換係数 $h_{pl}$ の評価

研究方法で述べた6種類の固体ファントムについて、次の研究手順から深さスケール係数  $c_{pl}$  と  $h_{pl}$  をMC及び測定から評価した。

#### (1) リニアック治療装置の光子線及び電子線の照射ヘッドのモンテカルロ (MC) シミュレーション

リニアック装置の照射ヘッド (幾何学的構造と材質等) のMCシミュレーションにおけるモデリングについて、4, 6, 10, 18 MVの

X線エネルギーと、4, 6, 9, 12, 15, 18 MeVの電子線を対象に測定ビームデータとの比較を通して行った。MCによる深部線量分布(PDD, OCR)の結果は、X線、電子線とも測定値と2%以内で一致した。

(2) 固体ファントムの測定における校正深の評価

各固体ファントムの校正深(X線は水等価深で10 cm, 電子線は  $d_{ref}=0.6R_{50}-0.1$ )は、各X線及び電子線エネルギーについて水ファントムに対する各固体ファントムの  $c_{pi}$  から求めた。 $c_{pi}$ は固体ファントムの化学組成とその重量比及び物理的密度( $g/cm^3$ )をもとに、MC法で計算した種々の物理データから算出し、電子密度計算や測定実験による  $c_{pi}$  と比較した。これらの  $c_{pi}$  値は、1%以内で一致することが確認できた。

(3) 固体ファントムから水ファントムへの電離量変換係数  $h_{pi}$  の算出と評価

Table 1は、4種類の壁の異なるFarmer-type電離箱について、MC計算による  $h_{pi}$  をX線エネルギーの関数として示す。

各X線エネルギーの校正深における  $h_{pi}$  の測定値とMC計算値は、1%以内で一致した。Fig. 2はPlastic waterとPlastic DTにおけるMC計算と測定の比較結果を示す。

Table 1. X線における壁の異なるFarmer-type電離箱に対する水と6種類の固体ファントムの電離量変換係数  $h_{pi}$  のMC計算結果

Phantom	Chamber	TPR <sub>20</sub> <sup>20</sup>	0.615	0.669	0.737	0.779
		PDD(10) <sub>x</sub>	61.8	66.3	73.3	80.9
RM1457	C110	1.004	1.006	1.009	1.014	
	PTW 30001	1.005	1.006	1.009	1.014	
	PTW 30013	1.005	1.006	1.010	1.016	
	PTW 30002 & 30004	1.004	1.006	1.009	1.014	
	Exradin A12	1.004	1.006	1.009	1.015	
WE211	C110	1.005	1.006	1.009	1.014	
	PTW 30001	1.005	1.006	1.010	1.015	
	PTW 30013	1.005	1.006	1.010	1.016	
	PTW 30002 & 30004	1.004	1.006	1.009	1.014	
	Exradin A12	1.004	1.006	1.010	1.015	
RW3	C110	1.008	1.010	1.016	1.024	
	PTW 30001	1.008	1.010	1.016	1.024	
	PTW 30013	1.009	1.010	1.017	1.025	
	PTW 30002 & 30004	1.007	1.009	1.015	1.023	
	Exradin A12	1.007	1.009	1.015	1.024	
MkDP	C110	1.017	1.020	1.027	1.036	
	PTW 30001	1.018	1.021	1.027	1.037	
	PTW 30013	1.018	1.020	1.028	1.038	
	PTW 30002 & 30004	1.015	1.018	1.026	1.035	
	Exradin A12	1.014	1.018	1.026	1.036	
PW	C110	0.995	0.996	0.998	0.998	
	PTW 30001	0.994	0.996	0.998	0.998	
	PTW 30013	0.995	0.997	0.999	0.999	
	PTW 30002 & 30004	0.995	0.997	0.998	0.998	
	Exradin A12	0.997	0.998	0.999	0.999	
PWDT	C110	0.996	0.996	0.998	0.999	
	PTW 30001	0.996	0.996	0.997	0.998	
	PTW 30013	0.996	0.997	0.999	1.000	
	PTW 30002 & 30004	0.997	0.997	0.998	0.999	
	Exradin A12	0.998	0.998	0.999	1.000	

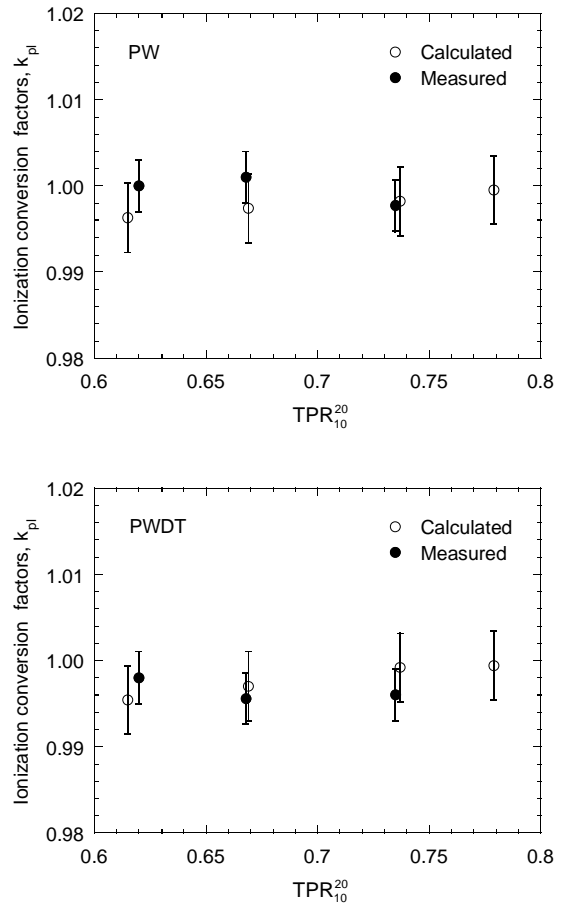


Fig. 2. X線におけるPlastic waterとPlastic DTの電離量変換係数のMC計算と測定の比較。電離箱はPTW30001を使用。

Table 2. 電子線における(a)RMI457とWE211, (b)Plastic waterとPlastic water DTの電離量変換係数のMC計算値。平行平板形電離箱はNACP-02, Roos, Markusである。

E (MeV)	$R_{50}$ (cm)	$d_{ref}$ (cm)	NACP-02		Markus		Roos	
			RMI-457	WE-211	RMI-457	WE-211	RMI-457	WE-211
4	1.31	0.69	1.009	1.009	1.005	1.005	1.009	1.010
6	2.37	1.32	1.008	1.010	1.010	1.010	1.011	1.012
9	3.59	2.05	1.005	1.007	1.003	1.004	1.010	1.012
12	5.06	2.94	1.006	1.004	1.004	1.005	1.007	1.008
15	6.27	3.66	1.005	1.006	1.007	1.008	1.009	1.008
18	7.60	4.46	1.005	1.006	1.006	1.010	1.008	1.010

E (MeV)	$R_{50}$ (cm)	$d_{ref}$ (cm)	NACP-02		Roos	
			PW	PWDT	PW	PWDT
4	1.31	0.69	1.006	1.006	0.998	0.998
6	2.37	1.32	1.001	0.998	0.996	1.001
9	3.59	2.05	1.002	1.006	0.998	0.996
12	5.06	2.94	1.001	0.997	1.003	1.000
15	6.27	3.66	0.999	0.998	1.002	1.002
18	7.60	4.46	0.998	1.003	1.002	1.005

(b)

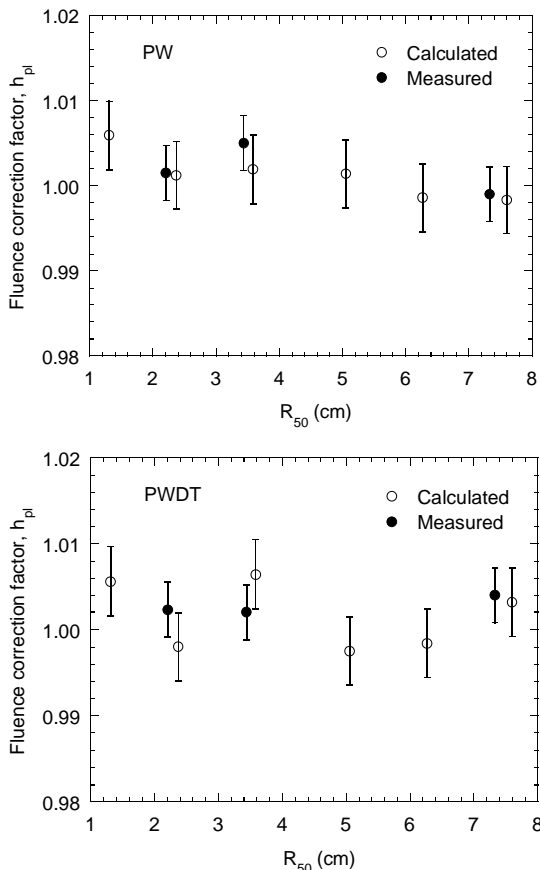


Fig. 3. 電子線における Plastic water と Plastic の電離量変換係数の MC 計算と測定の比較．電離箱は NACP-02 を使用．

Table 2(a), (b) は，電子線における各固体ファントムの電離量変換係数の MC 計算値を示す。 $h_{pi}$  は電子線の校正深において代表的な平行平板形電離箱 (NACP-02, Roos, Markus) について算出した．MC 計算による  $h_{pi}$  値は，測定値と 1% 以内で一致した．Fig. 3 は Plastic water と Plastic water DT における MC 計算と測定の比較結果を示す．

(4) 本研究結果から，放射線治療における水等価固体ファントムを用いた光子・電子線の水吸収線量測定法を確立した．本研究結果は，強度変調放射線照射等の高精度三次元放射線治療の線量検証における重要な物理データを提供した．今後は，これらのデータが利用され，高精度な線量評価が行われることを期待する．

#### 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7件)

Fujio Araki, Yuji Hanyu, Miyoko Fukuoka, et.al, Monte Carlo calculations of

correction factors for plastic phantoms in clinical photon and electron beam dosimetry, Med. Phys., 36, 2992-3001, 2009, 査読有

荒木不次男, 水等価固体ファントムによる吸収線量測定に必要な物理データの算出, 医用線量標準, 14(1), 19-24, 2009, 査読無

Fujio Araki, Monte Carlo calculations of correction factors for plane-parallel ionization chambers in clinical electron dosimetry, Med. Phys., 35, 4033-4040, 2008, 査読有

荒木不次男, 電子線治療の吸収線量測定における質量衝突阻止能比の照射野サイズ依存, 医用線量標準, 13(2), 23-26, 2008, 査読無

荒木不次男, 電子線ビームのモンテカルロシミュレーション, 医用線量標準, 12(2), 43-49, 2007, 査読無

Fujio Araki, Monte Carlo study of correction factors for the use of plastic phantoms in clinical electron dosimetry, Med. Phys., 34, 4368-4377, 2007, 査読有

荒木不次男, 光子ビームにおける水等価固体ファントムを用いた水吸収線量の評価, 日本放射線腫瘍学会, 19, 99-107, 2007, 査読有

[学会発表](計5件)

荒木不次男, 羽生祐二, 福岡美代子, 他 Plastic Water 及び Plastic Water DT ファントムを用いた水吸収線量の評価, 日本放射線腫瘍学会, 2008.10.16, 札幌市

Fujio Araki, Monte Carlo calculations of correction factors for plane-parallel ionization chambers in clinical electron dosimetry, 米国医学物理学会, 2008.7.27, テキサス, ヒューストン, アメリカ

荒木不次男, 電子線治療ビームのモンテカルロシミュレーション, 日本医学物理学会, 2008.4.5, 横浜市

荒木不次男, 高エネルギー電子線の吸収線量測定における平行平板形電離箱の補正係数  $P_{wall}$  の評価, 日本放射線腫瘍学会, 2007.12.14, 福岡市

荒木不次男, Monte Carlo study of correction factors for the use of plastic phantoms in clinical electron dosimetry, 日本医学物理学会, 2007.9.29, 新潟市

#### 6. 研究組織

研究代表者

荒木 不次男 (ARAKI FUJIO)

熊本大学・医学部・教授

研究者番号: 00295148