The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	光の影響を考慮した水等価ファントムの試作
Author(s)	藤﨑, 達也; 平岡, 武; 齋藤, 秀敏 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 2002, 62(2), p. 86-91
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/18521
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

光の影響を考慮した水等価ファントムの試作

藤﨑　達也[1)]　平岡　武[2)]　齋藤　秀敏[3)]　木村　雅哉[4)]　桑原　秋夫[5)]
村石　浩[1)]　阿部　慎司[1)]　西村　克之[1)]　稲田　哲雄[1)]

1)茨城県立医療大学保健医療学部放射線技術科学科　2)放射線医学総合研究所
3)東京都立保健科学大学　4)(株)京都科学　5)(財)癌研究会附属病院

Trial Production of Water Substitute Phantom Considering the Effect of Light

Tatsuya Fujisaki[1)], Takeshi Hiraoka[2)], Hidetoshi Saitoh[3)], Masaya Kimura[4)], Akio Kuwabara[5)], Hiroshi Muraishi[1)], Shinji Abe[1)], Katsuyuki Nishimura[1)] and Tetsuo Inada[1)]

We have produced a novel water substitute phantom suitable for film dosimetry, while retaining the radiological property of a conventional water substitute phantom. The novel phantom excludes the effect of light, which is known to affect the accuracy of results on conventional phantoms. The effect of light was eliminated by appropriately adjusting the quantum of the carbon black to that of a conventional phantom material. Through comparison of the novel phantom with a conventional phantom it was shown that the absorbed dose determined by conventional phantom was 15% higher for 10 MV X-rays and 18% higher for an 18 MeV electron beam, attributable to the contamination of Cerenkov light.

Although the net optical density of the film increased with time owing to the optical permeability of the phantom, that of the novel phantom did not vary with time. The novel phantom was therefore shown to be unaffected by such local light and by the optical transmission of the phantom.

Research Code No.: *203.9*

Key words: *Water substitute phantom, Tough water phantom, Film dosimetry, Light effect*

Received Jul. 3, 2001; revision accepted Jan. 17, 2002

1) Department of Radiological Sciences, Ibaraki Prefectural University of Health Sciences
2) National Institute of Radiological Sciences
3) Tokyo Metropolitan University of Health Sciences
4) Kyoto Kagaku Co.
5) Cancer Institute Hospital

別刷請求先
〒300-0394　茨城県稲敷郡阿見町阿見4669-2
茨城県立医療大学放射線技術科学科
藤崎　達也

はじめに

放射線治療領域の吸収線量測定において，人体内に直接線量計を挿入して線量測定することは困難である．そのため，人体の主要組織である筋肉と等価な水を使用した線量測定が推奨されている[1)]．しかし，2次元線量計であるフィルムを使用して水中で線量分布を測定することは実用上困難であるため，一般に水と等価な固体ファントムが使用されている[2)]．

タフウォータファントム(京都科学社製：WE)は，耐久性や加工性に優れている水等価の固体ファントムとして広く知られている[3)]．この水等価ファントムとフィルムを用いた簡便な線量測定としては，まず，水等価ファントム中に遮光包装されたレディパックフィルム(コダック社製X-Omat V)を挿入した後，ある線量を照射する．次に，挿入したフィルム位置に電離箱実効中心を配置して，等しい線量を照射する．現像処理したフィルムの黒化度と電離箱線量計で得られた吸収線量の関係を知ることで，フィルム上の黒化度分布を2次元の吸収線量分布に変換することができる．

このフィルム法による測定は，そのほとんどを明室で作業が行え簡便であるが，フィルムの包装が線量分布に影響することも指摘されている[4),5)]．そのため，フィルムのみをファントム物質で加工されたカセッテに挿入し，フィルム測定ができるファントム材カセッテも市販されている[6),7)]．フィルムによる線量測定は，圧着，乳剤のエネルギー依存性および方向依存性などのさまざまな問題が指摘されているので[5),8),9)]，包装など線量測定における不確定因子を取り除きながら測定することが望ましい．一方，フィルムのみをファントム内に挿入して線量測定を行う場合，アクリルなどの透明度の高いファントム内ではチェレンコフ放射による光がフィルムを感光することが知られている[1),10)]．また，ファントム材カセッテなどの製作上，ファントム自身の光透過が問題となる．

われわれは，タフウォータファントムの着色能に注目し，高エネルギーX線および電子線のフィルム法による測定において，フィルムを直接ファントム内へ挿入可能な水等価ファントムを試作した．そして，フィルムとファント

ムを直接接触させたフィルム法による測定において，従来のファントムと試作したファントムを使用してチェレンコフ放射と光透過による光の影響を測定したので報告する．

方　法

1．ファントムの試作

新しい水等価ファントムの試作は，タフウォータファントムの構成元素と製造過程の一部を調整変更することで行った．基本的には，タフウォータファントムとほぼ同一工程で製造しており，放射線に対する物理的特性はタフウォータファントムとほぼ同一と予測された．

新しいファントムの製造は，最初にタフウォータファントムの基本材料であるエポキシ樹脂(GY-260)量に対して，カーボンブラック(デンカブラック：アセチレンブラック100％)を3wt％投入し撹拌することでエポキシブラックペーストを製作する．次に，このエポキシブラックペーストをファントム製作に必要な量のGY-260に投入し撹拌する．以降の固形化などの工程は，タフウォータファントムの製造と同一である．

タフウォータファントムと試作したファントムについて，密度，光電効果に関する実効原子番号および電子密度に加え，放射線に対する物理的特性として重要な光子エネルギーに対する質量減弱係数〔μ/ρ(cm^2/g)〕と電子エネルギーに対する質量衝突阻止能〔S/ρ(MeV cm^2/g)〕を計算し比較した．計算は，米国NIST (National Institute of Standards and Technology)のホームページ上において光子の断面積データベースXCOMおよび電子の断面積データベースestarを使用して行った[11]．

2．光の影響の測定

2．1　チェレンコフ光による影響

チェレンコフ光による影響の測定は，公称エネルギー10MVX線と18MeV電子線を発生する直線加速器(東芝メディカル，MEVATRON KD2/65)を使用して行った．タフウォータファントムと試作した水等価ファントムを使用して，10MVX線ビームのSTD 100 cm，照射野10×10 cm^2，深さ5cmにおける軸外線量分布と，SSD 100cm，照射野10×10cm^{2}における深部線量分布を測定した．同様に，18MeV電子線ビームのSSD 100cm，照射野15×15cm^2，深さ3cmにおける軸外線量分布と，SSD 100cm，照射野15×15cm^{2}における深部線量分布を測定した．黒化度－線量校正曲線を作成するためのフィルム照射は，軸外線量分布測定と同様に行い，校正曲線を4次の多項式で近似した．また，照射室を全暗にし，かつ，フィルムを挿入するファントム面の半分を0.1mm厚以下の遮光紙(コニカ社製，特注)で被い，放射線ビームを照射することで，チェレンコフ光の影響を測定した．

フィルムは，市販されている放射線治療用フィルム(コダック社製，X-Omat V)をレディパック包装から取り出してファントム間に挿入し，ビーム軸がフィルム面に対して垂直および平行方向で照射した．積層ファントム間の側面は，スプライステープ(コニカ社製，#9385)で遮光および固定した．照射されたフィルムは，自動現像機(富士メディカルシステム社製，FPM2500)を30.8℃，全処理時間90秒で現像処理した．黒化度は，直径1.6mmのアパーチャサイズを有する走査形濃度計(ウェルホッファ社製，WP102)で測定した．また，フィルム同一位置での吸収線量の算出には，ファーマー形線量計(PTW社製，30001)を使用した．

2．2　光透過による影響

Fig. 1にファントムの光透過による影響を測定するための幾何学的配置を示す．フィルム上にファントム1cmをのせ，日常の放射線測定を行う環境光を使用して，ファントムの光透過を測定した．ファントム側面はスプライステープで遮光および固定し，環境光が1cm厚のファントムとフィルム面に対してほぼ垂直入射となるようにした．また，フィルム後面からの光を防止するためにフィルム下面も遮光した．ファントムへの環境光の露光は，環境光の入射時間を1～7分間まで1分間隔で変化させた．環境光の照度は，照度計(東京硝子器械社製，FLX-1334)を使用して測定しファントム前面において150luxであった．

露光後のフィルムは，現像処理後，拡散光濃度計(コニカ社製，PDA65)を使用して黒化度を測定した．使用したフィルムや現像処理は，「2．1　チェレンコフ光による影響」と同様である．

結　果

1．ファントムの試作

Fig. 2には，タフウォータファントムと試作した水等価ファントムを示す．外観は，ファントム自身が乳白色から黒色に変わったのみである．Table 1には，これらのファントムの物理的特性を示す．密度，光電効果に関する実効原子番号および電子密度はほぼ同一で，質量減弱係数〔μ/ρ(cm^2/g)〕と質量衝突阻止能〔S/ρ(MeV cm^2/g)〕は25 MeVまでの各エネルギーに対して，最大0.5％の差異であった．

2．光の影響の測定

2．1　チェレンコフ光による影響

Fig. 3は，ビーム軸に対して垂直方向で照射された10MVX線と18MeV電子線の濃度プロファイルを示す．図中の水平軸のマイナス方向は非遮光側であり，チェレンコフ光による影響を示す．10MVX線と18MeV電子線において，タフウォータファントムでは各々約15％と約18％の黒化度の増加が示されたが，試作したファントムでは各位置において1％以下であった．

次に，チェレンコフ光による影響を防止したタフウォータファントムによるプロファイルと，試作したファントムによるプロファイルを濃度-線量校正曲線で線量変換後の軸外線量分布をFig. 4に示す．10MVX線および18MeV電子線にお

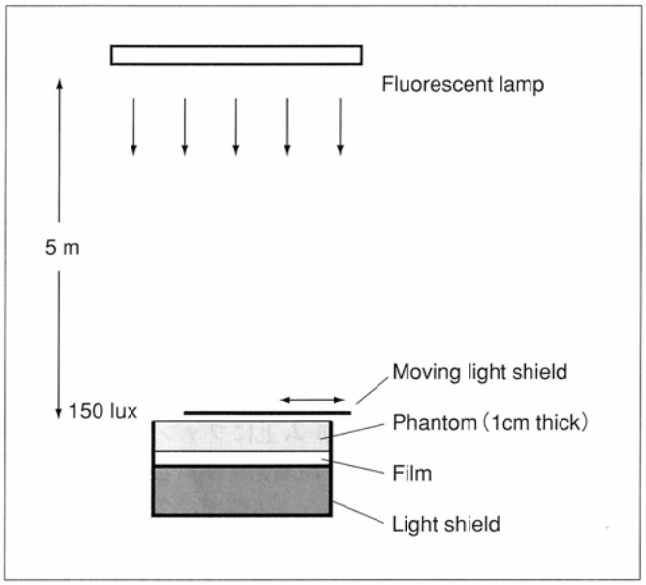

Fig. 1 Experimental setup used to evaluate the light permeability of the phantom.

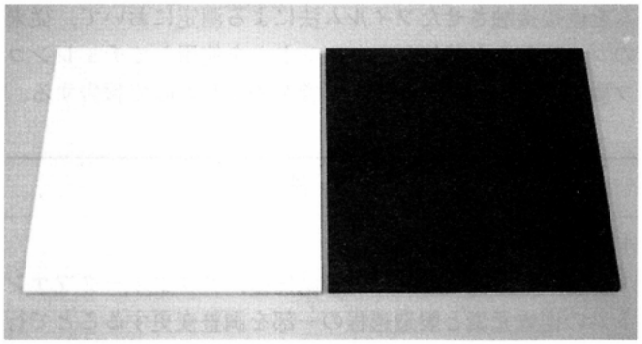

Fig. 2 Photograph of a Tough Water phantom (left side) and the water substitute phantom (right side). The colors are milky white and black, respectively.

Table 1 Atomic composition of phantom material, density, effective atomic number and electron density of phantom.

Element	Atomic composition of materials	
	Tough Water phantom	Produced phantom
H	0.0821	0.0807
C	0.6633	0.6691
N	0.0221	0.0217
O	0.2065	0.2030
Cl	0.0040	0.0039
Ca	0.0220	0.0216
Density (g/cm^3)	1.017	1.014
Effective atomic number Z_τ	7.44	7.40
Electron density (e^-/g)	3.25×10^{23}	3.25×10^{23}

いて，両ファントムの軸外線量比は良い一致を示した．

Fig. 5は，ビーム軸に対して平行方向で照射された10MV X線と18MeV電子線の深部線量分布を示す．軸外線量比と同様に，両ファントムの深部線量分布は良い一致を示した．

2．2 光透過による影響

Fig. 6に露光時間による黒化度の変化を示す．タフウォータファントムでは，露光時間と黒化度はほぼ直線関係で増加することが示されたが，試作したファントムでは，測定最長時間まで変化しなかった．

考　察

試作した水等価ファントムは，タフウォータファントムに僅かなカーボンのみを添加して製作したものである．そのため，放射線に対する物理的特性はタフウォータファントムとほぼ同一であり，水等価物質と考えられた．

タフウォータファントム中で遮光しないフィルムを用いた測定において，X線および電子線に対してチェレンコフ光による黒化度への影響が示された．水中におけるチェレンコフ光の発生や[13),14)]，透明のアクリルファントム内で電子線線量分布測定時のチェレンコフ光が指摘されてきたが[1),10)]，不透明なファントムでもチェレンコフ光の発生が示された．尾内も不透明なファントムでのチェレンコフ光を指摘している[15)]．チェレンコフ放射は，荷電粒子が物質中を通過するときに，その速度が通過する媒質中における光の位相速度より大きいときに光を放出する現象である[16)]．媒質中の光の速度は，屈折率をnとするとc/nであるから，荷電粒子の速度が$v \geqq c/n$では，チェレンコフ光が発生する．すなわち，チェレンコフ光の発生にはしきいエネルギーが存在

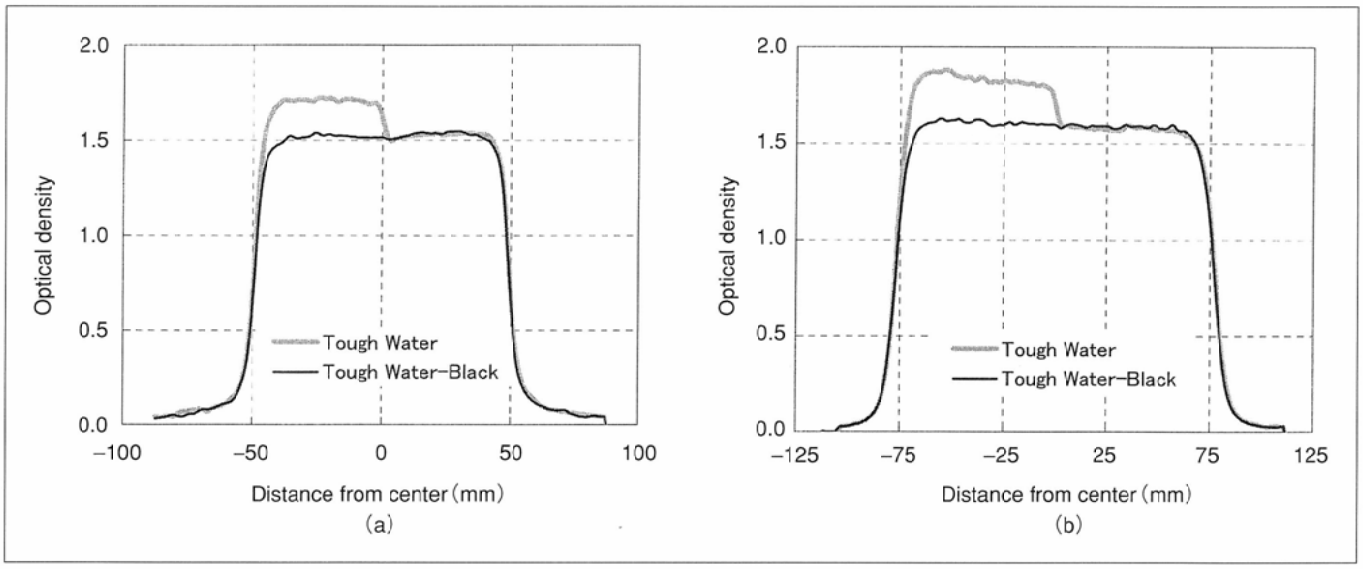

Fig. 3 Comparison of off-axis density profiles between the Cerenkov light effect (left side) and shielding light effect (right side) in the Tough Water phantom and the novel water phantom.
A: Data for 10 MV X-ray measurements made at a 5 cm depth for a 10 cm × 10 cm field at 100 cm STD.
B: Data for 18 MeV electron measurements made at a 3 cm depth for a 15 cm × 15 cm field at 100 cm SSD.

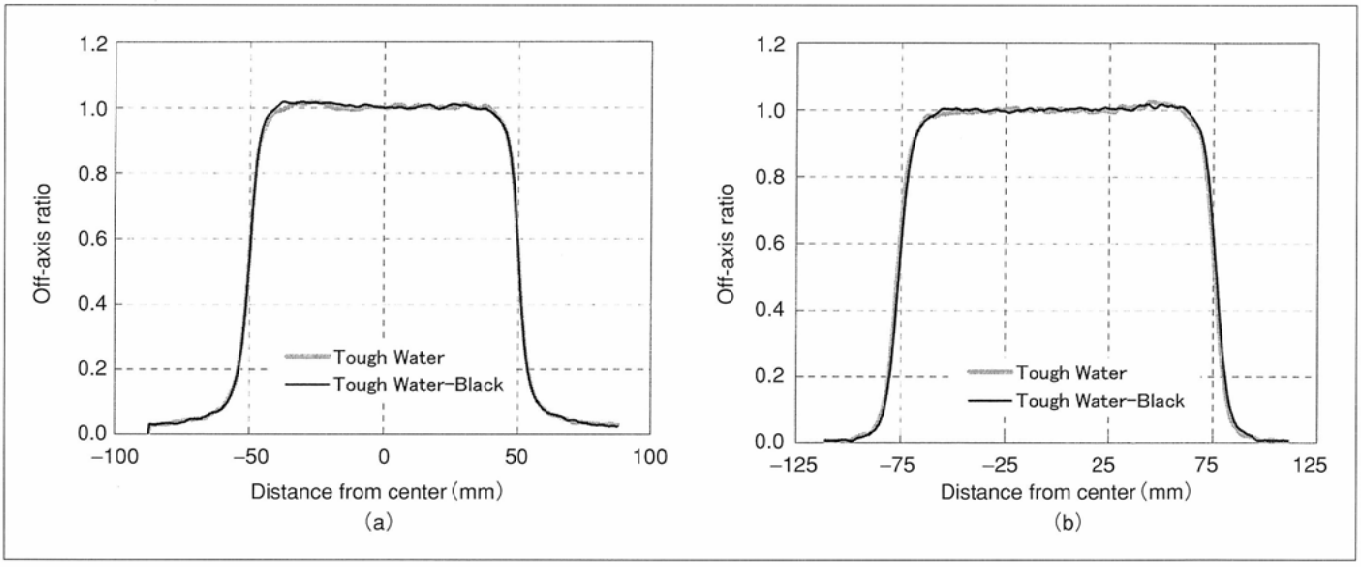

Fig. 4 Comparison of off-axis dose profiles between the Tough Water phantom and the novel phantom. The profiles were converted to a density-dose calibration curve and normalized to the central-axis dose. The calibration curve measurement was done using an ion-chamber.
A: Data for 10 MV X-ray measurements made at a 5 cm depth for a 10 cm × 10 cm field at 100 cm STD.
B: Data for 18 MeV electron measurements made at a 3 cm depth for a 15 cm × 15 cm field at 100 cm SSD.

し，水の屈折率は1.34であるから[17]，電子のしきいエネルギーは0.25MeVとなる．したがって，高エネルギーX線や電子線を日常使用している固体ファントムに照射すると，ファントム内でチェレンコフ光が発生している．チェレンコフ光の影響がX線よりも電子線の方が大きいのは，チェレンコフ光が電子線フルエンスに比例して発生するためと考えられる[18]．Steidleyらは，X線や電子線治療におけるチェレンコフ光を臨床的・定量的分析を報告している[18]．また，Dutreixは電子線ビーム軸に対して垂直方向で照射された透明のアクリルファントム中のフィルムの黒化度が40%まで上昇することを述べている[19]．

本研究で試作したファントムは，軸外線量分布や深部線量分布において，タフウォータファントムと良い一致を示した．ファントム物質によりチェレンコフ光の黒化度への影響は異なることから，不均質ファントム中で精度のよい線量分布を測定するには，チェレンコフ光の防止が望ましいと思われる．また，ファントムの光透過の影響は，時間(光量)に直線的に比例することが示された．これは，フィルムとファントムを直接接触させたフィルム法による測定において，ファントム自身の光透過の影響を示している．タフウォータファントムは乳白色であるため，環境光がファントムを透過しやすい．試作したファントムでは1cmの

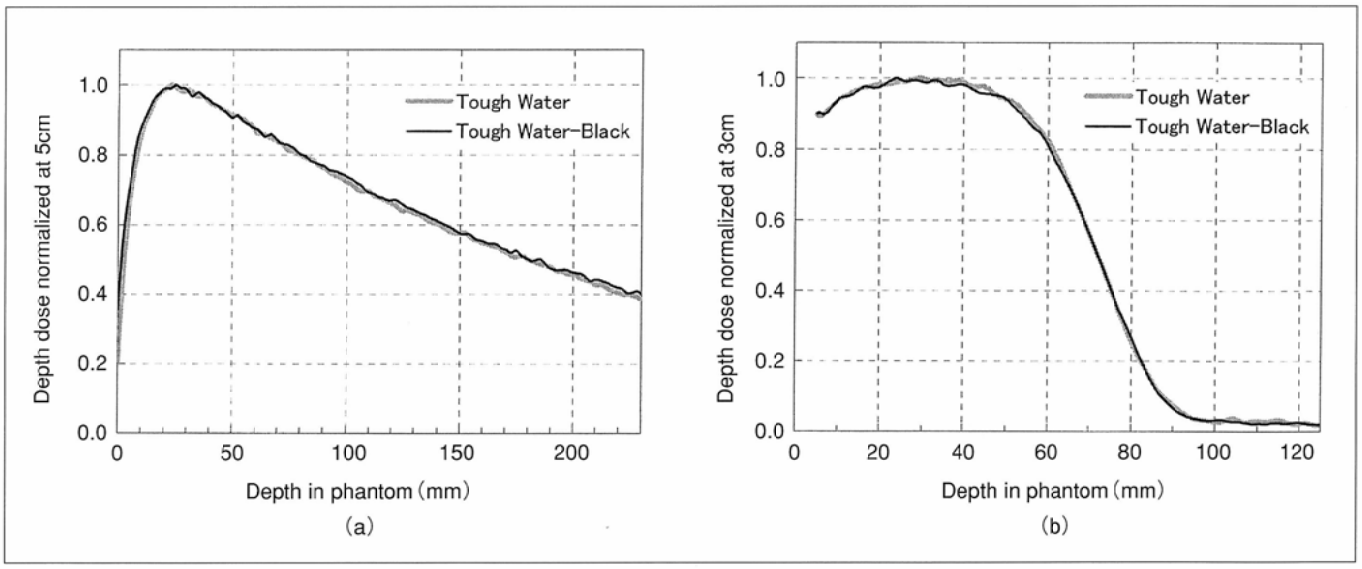

Fig. 5 Comparison of central-axis depth dose curves between the Tough Water phantom and the novel phantom.
A: 10 MV X-ray; 10 cm × 10 cm field; 100 cm SSD.
B: 18 MeV electron; 15 cm × 15 cm field; 100 cm SSD.

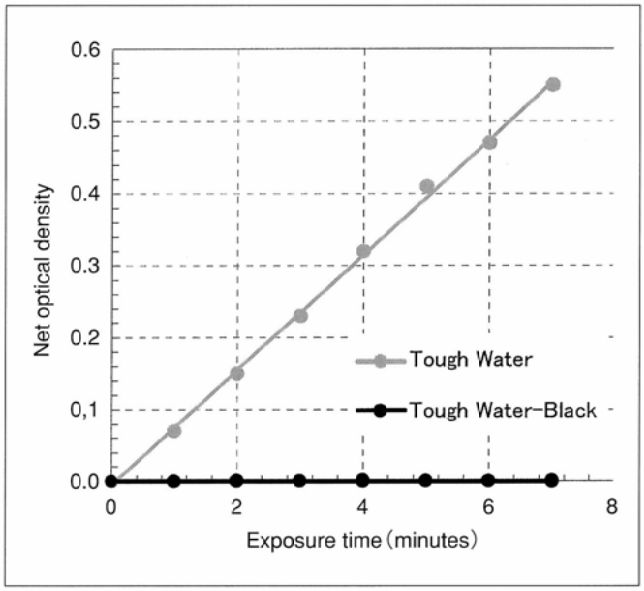

Fig. 6 Variation in optical density as function of time.

厚さで光透過の影響が観察されなかった．ファントムの光透過は，ファントム材カセッテを試作する上で特に重要になると思われる．われわれは，ファントムのチェレンコフ光および光透過の影響を，ファントム材を黒く着色することで防止した．電離箱など電離量を利用した線量測定では，光の影響を受けないためタフウォータファントムを使用できるが，フィルムなどの光検出器がファントムと直接接触する場合に光の影響を防止する必要がある．試作したファントムはファントムを要因とした光の影響を防止できるためファントム材カセッテにも有用であることを示唆した．

まとめ

われわれは，高エネルギーX線および電子線のフィルム法による測定において，フィルムを直接ファントム内への挿入が可能な水等価ファントムを試作した．それは，タフウォータファントム製造工程に僅かなカーボンブラックのみを添加して黒く着色したものである．試作した水等価ファントムは，放射線に対する物理的特性はタフウォータファントムと同等と考えられた．

また，タフウォータファントムと試作したファントムを使用してチェレンコフ放射と光透過によるフィルム法にお

ける光の影響を測定した．その結果，フィルムとファントムを直接接触させたフィルム法による測定において，タフウォータファントムではX線および電子線に対してチェレンコフ光や光透過の影響があることが示された．そして，これらの光の影響は，試作したファントムで防止できることを明らかにした．

文　献

1) 日本医学放射線学会物理部会：放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法．80–82，1989通商産業研究社，東京
2) 尾内能夫，楠本五郎：水と等価な固形phantomの試作．日医放会誌 19：116–120，1959
3) 平岡　武，入船寅二，川島勝弘，他：不均質ファントムの試作．放治システム研究 5：34–37，1988
4) 平林久枝：放射線治療領域におけるフィルム線量測定法の有効利用と問題点．日放技学誌 51：48–61，1995
5) Suchowerska N, Hoban P, Buston M, et al: Directional dependence in film dosimetry: radiographic and radiochromic film. Phys Med Biol 46: 1361–1397, 2001
6) Bova FJ: A film phantom for routine film dosimetry in the clinical environment. Medical Dosimetry 15: 83–85, 1990
7) Shiu AS, Otte VA, Hogstrom KR: Measurement of dose distributions using film in therapeutic electron beams. Med Phys 16: 911–915, 1989
8) Suchowerska N, Hoban P, Davison A, et al: Perturbation of radiotherapy beams by radiographic film: measurements and Monte Carlo simulations. Phys Med Biol 44: 1755–1765, 1999
9) 尾内能夫，都丸偵三，入船寅二，他：写真フィルムによる高エネルギーX線の線量分布測定法の再検討．日医放会誌 31：1224–1236，1972
10) 西台武弘：放射線治療物理学．176–178，1996，文光堂，東京
11) National Institute of Standards and Technology: "Photon Interaction Cross Section Library". Radiation shielding information center data package DLC-136/PHOTX
12) 尾内能夫，鶴田重彦，都丸偵三，他：フィルム法によるチェレンコフ輻射の観察．RADIOISOTOPE 13：241–243，1964
13) 田伏勝義，田宮　正，日比野幸子，他：Co-60線源を用いたチェレンコフ光の観察．医学物理 20 Sup.4：162–164，2000
14) 日比野幸子，田宮　正，小山修司，他：治療用Co-60照射装置を利用したチェレンコフ光の観察．医学物理 21：111–117，2001
15) 尾内能夫：光子とその一族(その1)．日医放物理部会誌 9：71–92，1989
16) Jelley JV: "Cerenkov Radiation and its Applications", 1958, Pergamon Press, Oxford (UK)
17) Born M , Wolf E: "Principles of Optics", 1974, Pergamon Press, Oxford (UK)
18) Steidley KD, Eastman RM, Stabile RJ: Observations of visual sensations produced by Cerenkov radiation from high-energy electrons. Int J Radiat Oncol Biol Phys 17: 685–690, 1989
19) Dutreix J, Dutreix A: Film dosimetry of high-energy electrons. Annals New York Academy of Sciences: 33–43, 1969