

MRI の性能評価用, PVA ゲルファントムの研究 —特にゲル化の方法と撮影時の Q 値について—

真野 勇¹, 小林 智和², 森 弘敏 夫²
桑原 修², 辻田 和彦³, 土谷 義夫¹

¹東芝中央病院中央放射線部

²日本石油株式会社開発部

³東芝医用機器事業部那須工場

1. はじめに

MRI ファントムは, 装置の研究開発や生産, 出荷, 設置, 臨床, 等の各段階において必要であるが, 本文ではこのうち, 装置のユーザーとしての立場でこの課題を扱う. この MRI ファントムは, その利用目的から言って, 臨床段階においては標準化されるべきものである. しかし現状にあつては, この標準化は全くと言ってよいほど, 行われていないため, 学会が委員会を作り, これを標準化すべく势力的に活動を開始している. 表 1 は, 竹中¹⁾らによる MRI の画像評価因子である. AAPM (American Association of Physicists in Medicine) や NEMA

(National Electrical Manufacturers Association) からも, 近い将来勧告文が発表されると言われている.

MRI の性能評価の標準化が難しい理由は, 主に次の 3 点にあると思われる. (1) ファントム用としての適当な人体等価物質がない. MR 信号が, 被写体側にあつては, 物理学的因子に加え生物学的因子によつても大きく影響されるからである. (2) 信号が, 被写体や装置の変化に対して鋭敏であるため, 濃度面での定量評価が困難. (3) 画像に影響する因子が多いため, 性能評価項目が膨大となる.

現在ファントム用材料としては, Mn^{++} や Ni^{++} , Cu^{++} , Fe^{++} や Fe^{+++} を適量含有する水溶液, 他にポリアクリルアミド, 寒天, ゼラ

キーワード PVA gel, phantom, Q value, anthropomorphic phantom

表 1 MRI 画質の評価因子¹⁾

- | |
|---------------------------------------|
| 1) 空間的・時間的均一性 (大きさ, 位置) |
| 2) 空間雑音 |
| 3) 歪み (同一平面内の位置, コントラストの歪み, スライス面の歪み) |
| 4) アーチファクト (患者の動き, 機構) |
| 5) 空間分解能 (低コントラスト) — スライス面内 |
| 6) スライス厚 |
| 7) T_1 , T_2 の測定 |
| 8) プロトン密度 |
| 9) 流速因子, 拡散因子, 温度因子 |
| 10) 空間分解能, スライス厚さの位置及び位置依存性 |
| 11) エッジ効果 |
| 12) 信号強度レベル, 表示レベル |
| 13) 再現性 |

[注] これらの因子は横断面, 前額断面, 矢状断面のそれぞれのマルチスライス映像の各断面についても考えねばならない。

チン, 等が候補となっているが, いずれも人体組織からはほど遠い, 不安定, ファントム製造が困難, 等の問題があり, 一般化するには至っていない。これらに対して筆者らは, 南部による PVA (Polyvinyl Alcohol) ゲルが²⁾, MRI のファントム用材料として大変適していると報告してきた³⁾。MRI パラメータ (含水率すなわち ρ 並びに T_1 , T_2) の点で, 人体等価である。材料としての安定性が高い, 製造が容易, 等という性状を有しているからである。本 PVA のゲル化の方法については, その後, 後記の如く改良が加えられた。

他に筆者らは, ファントムを撮影しているときの Q 値 (MRI 装置の RF コイルの性能を現わす値) と, 人体撮影しているときの Q 値との関係について検討を行った。周知の如く Q 値には

$Q^{1/2} \propto S/N$ (Signal/Noise), の関係がある。つまり実際の臨床との間で Q 値に差があれば, その分だけかけ離れた S/N のもとの, 性能評価を行うことになるからである⁷⁾。

そこで本研究では, まず, 最近における PVA のゲル化の方法について報告する。そして, その手法を用いて製作した, 代表的なファントム例を紹介する。最後に, ファントムを撮影している時の Q 値について実験を行い, 知見を得たので報告する。現在, 一般的に用いられているファントムにあつては, Q 値の点で問題があるわけで, PVA ゲル製の人体模擬ファントムによってこの問題点を克服し得る事を確認した。

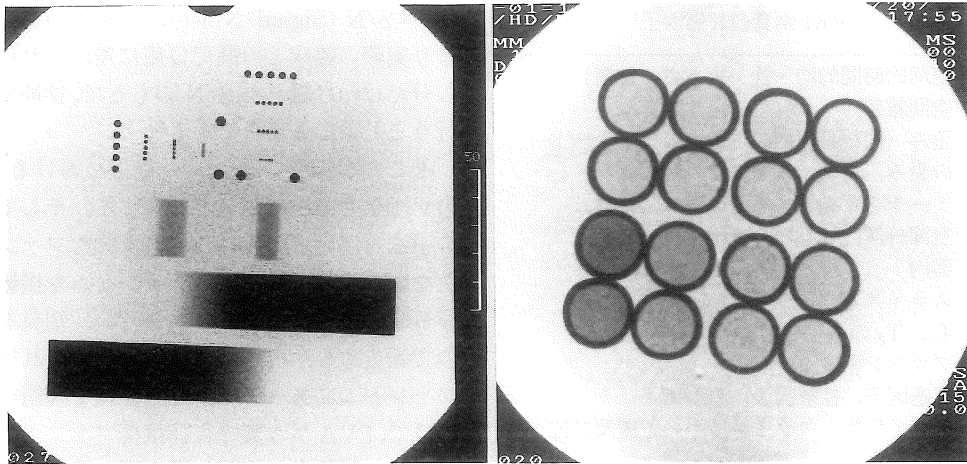
2. PVA ゲルとファントムの製造

本件に関しては, すでに文献 3) で詳しく報告した。前記の如く PVA ゲルは, MRI パラメータの点で人体の軟部組織とほとんど等価, パラマグネティックイオンやグラファイトの混入で T_1 や T_2 をある程度制御し得る, 安定性が高い等, MRI ファントムとしての諸条件に恵まれたゲル状物質である。

一方最近, PVA 溶液のゲル化の方法に関して改良が加えられた。すなわち当初は, 南部の原法²⁾に基づいて, 凍結と解凍の操作によってゲルを得ていたが, 内部歪の発生で, ファントムの破壊や変形が多かった。しかしその後, 超音波や振動などの物理的的刺激を適量加えることでも, 同一のゲルが得られることが分かった (特開昭 63-327983)。そこで MRI ファントムについては, 超音波でゲル化を行うこととした。この手法の導入によって, ファントムが安定化し, しかも精密に作製できる事となった。なお, ゲル化の方法を変えても, PVA ゲルの T_1 , T_2 には著変は無いことも分かった。

受付年月日 1990年6月8日

別刷請求先 (〒140) 品川区東大井6-3-22 東芝中央病院放射線科 真野 勇



(a) 空間解像力

(b) 濃度分解能

図 1 アクリルと PVA ゲルとで製作したファントムの代表的 MR 像
PVA ゲルは基本としては、80%の含水率と

なっている。パルス系列はいずれも SE 500/40。

図 1 が、上記の方法によって作成された MRI ファントムの代表的な MR 像である。アクリル樹脂で型を作り、PVA ゲルの溶液を注入し、超音波でゲル化を行っている。これらの画像からも PVA ゲルは、均一である、わずかな濃度変化をもつけ得る、内部歪をもたらないため精巧なファントムを作製し得る、といった特長を持つ事が分かる。

3. MRI ファントムと Q 値 —人体模擬ファントムの開発—

1) 実験条件

周知の如く、純水負荷時の Q 値は導電性イオンが無いため、空気負荷時の Q 値とほとんど同じである。従って筆者らは、PVA ゲルを製作する際の水を、全て生理食塩水 (0.9% NaCl) にすることとした。

Q 値測定システムは次の如くである。すなわち、筆者らが診療で用いている東芝製 MRI 装

置 (0.5 T, MRT-50 A) の頭頸部用コイル内に下記の被検体を入れることとした。そしてサーチコイルには直径 3.5 cm の物を 2 ケ、スペクトロアナライザーには ADVANTEST 社製 TR 4172 を用いた。

Q 値の測定実験を 2 つのシリーズに分けて行った。第 1 シリーズでは、6.4 MHz~42 MHz の範囲において 2 MHz 間隔で測定した。この際の被検体は、(1) 正常成人の頭頸部 (=コントロール)、(2) 無負荷 (空気)、(3) 5 mm 厚アクリル板による一辺 14 cm 立方体の容器に生理食塩水を満たした物、(4) (3) の容器に 12 mmol/l の硫酸銅水溶液を満たした物、(5) 図 2 のごとき PVA ゲル製の成人大の人体頭頸部模擬ファントム、の 5 種類である。

一方、第 2 シリーズの実験では、被検体は、(1) 第 1 シリーズと同一人物の頭頸部 (=コントロール)、(2) 表 2 の左の列の如き PVA ゲル製のファントム (計 4 種類。表 2 の左下ファントムの横へ広がった部分は、ヒトの肩を模擬してい

る),(3) 図2のPVAゲル製の人体模擬ファントムである。この第2シリーズでのQ値測定の周波数は、36, 38, 40, 42 MHzの計4点である(これより低い周波数については、一部の器具不足と、本実験の目的に鑑みて、対象としなかった)。

2) 測定結果

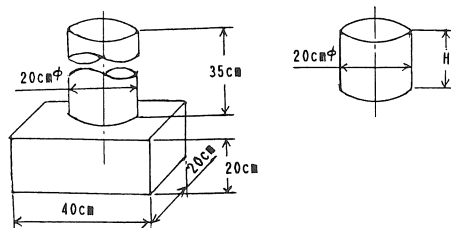
もとより本実験において行われるQ値は、コイルを初めとする実験用器具の性能に大きく左右される。そこで本文では、各周波数において、

表2 種々の被写体に対する相対的Q値
(人体頭頸部の場合を基準としている)

被写体 \ MHz	36	38	40	42	平均
人体頭頸部 (コントロール)	100	100	100	100	100%
人体頭頸部模擬の PVAゲル製ファントム	90	98	103	97	97%
PVAゲル製 “ファントム1”注1	153	161	162	158	159%
PVAゲル製 “ファントム2”注1	145	151	155	153	151%
PVAゲル製 “ファントム3”注1	144	151	152	148	149%
PVAゲル製 “ファントム4”注1	123	128	132	133	129%

注1 上記表中の“ファントム1~4”は次の如き形状である。

- ・ファントム1は右図で、H=20 cm
- ・ファントム2は、H=30 cm
- ・ファントム3は、H=35 cm
- ・ファントム4は、



正常人頭頸部を被検体とした場合のQ値を100%として、それとの相対値で全て示すこととする。

図3が、第1シリーズ実験の場合の結果である。周波数との関係で示した。第2シリーズ実験の結果については、表2に示した。

3) Q値測定の結果についての考察

第1シリーズの実験結果について：

図3によると、無負荷の場合のQ値は、22 MHz付近をピークとする、上に凸のパターンである。各周波数共、人体撮影時のQ値からは大きく隔たっている。一方、硫酸銅や生理食塩水を満たした角形ファントムの場合には、高周波領域で次第に高値となる傾向にある。これまた、いずれの周波数についても、人体撮影時のQ値からはかなり隔たっている。これらに対して、PVAゲ

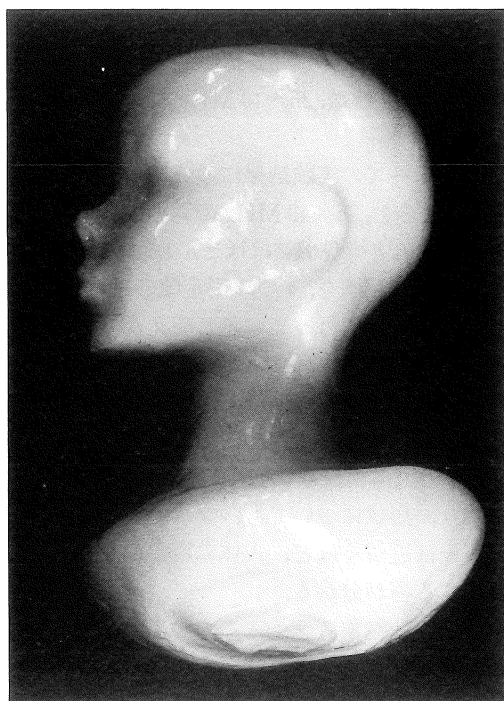


図2 人体模擬のPVAゲル製ファントム

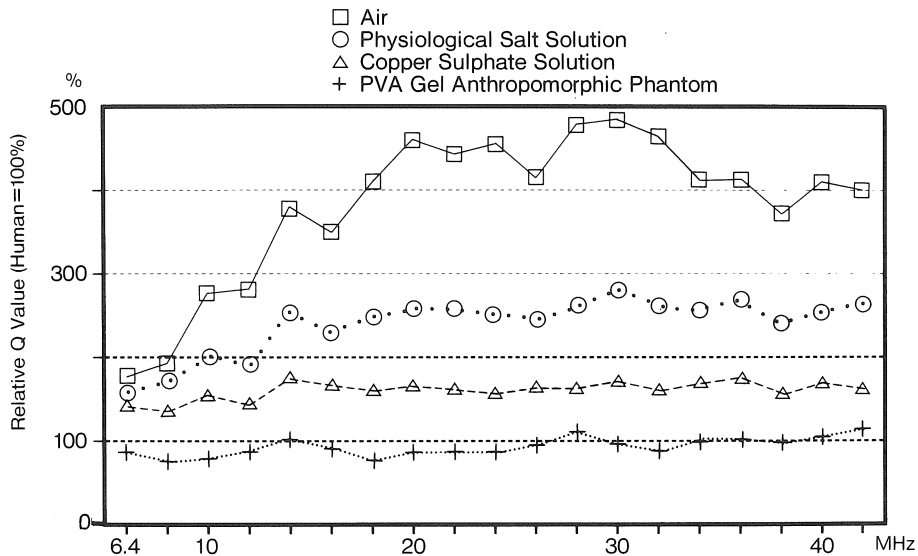


図3 被写体(ファントム)の違いとQ値との関係(人体の頭頸部を対象とした場合を100%としている)。

ル製の人体模擬ファントムの場合、高周波領域でわずかに高値となるパターンではあるが、全体としては、人体頭頸部撮影時のQ値に大変近似している。特に、26~40 MHz 付近で顕著である。

第2シリーズの実験結果について：

表2によると、36~42 MHzの範囲にあつては、各ファントムともQ値にはほとんど違いがない。従つてQ値の評価を、4つの測定値の平均値(表2の右列参照)で行つても差し支えないと考える。その平均値は、ファントムの体積が人体のそれに近づけば近づくほど、人体の場合のQ値に一致してくる。また、表2左下のファントムや図2の人体模擬PVAゲルファントムの実験結果より、形状についても、ファントムが人体に近づけば近づくほど、人体の場合のQ値に一致してくる事が分かる。

以上より、対象スライスについては若干限界のある結論ながら、生理食塩水や硫酸銅水溶液だけを満たした角形ファントムは、 ρ や T_1 , T_2 の点以外に、Q値の点でも不向きである事が分

かる。それに対して、PVAゲル製のファントムの場合、これらの点で比較的人体等価である。特に今回の実験によれば、PVAゲル製ファントムの体積と形が、人体のそれに近づけば近づく程、両者の場合のQ値が一致してくるということが分かつた。例えば、26~40 MHzの範囲においては、PVAゲル製の人体模擬ファントムに対するQ値は、ヒトの頭頸部に対するQ値に5%以内で一致した。これらのことより、S/N比等に関係するパラメータの測定を行う場合は、PVAゲル製の人体模擬ファントムを利用することが望まれると考える。

4. 全体の考察

MRIが、臨床で真に利用され得るということが確認されたのは、1980年代に入ってからである。その後10年間、MRIは、目ざましく進歩発展した。本邦でも既に、数百台が設置されたと言われる。この様な背景にあつてMRIの性能評価という課題は、前述のごとく種々の困難さの

ゆえに、あまりアプローチされて来なかった。

このことは結局、MR画像を定量的に評価し得ないことを意味するわけで、MRI技術にとって、またMRI臨床の品質管理や発展を計って行く上で、重大な問題である。もとより、MRI画像の性能評価は、たとえ不備なファントムしか入手できないとしても、その時代々において、実施されるべきである。対象となっているパラメータのうち、幾つかについては、意味ある結果が得られるからである。

既述の如くファントム用材料としては、現在、 Ni^{++} や、 Cu^{++} 等の水溶液が利用されている⁷⁾。しかしこれらのパラマグネティックイオン水は、一般に、生体並みの T_1 が達成されたとき T_2 が過大となる⁴⁾。含水率に至っては、生体軟部組織からはほど遠い値である。それに対して、少しでも生体に近いものということで、ポリアクリルアミドやスミカゲル(アクリル酸ポリビニールアルコール複合架橋ゲル)、寒天(アガロース)等が候補としてあげられた^{5),6)}。しかしいずれも、緩和時間の問題や、安定性、成形性等の問題のため、一般化するには至っていない。

これらの材料と比較すると、本文と文献3)で報告したPVAゲルは、現存のファントム用材料としては、最も優れた性状を有するようと思われる。すなわち、MRIの決定的なパラメータである、 ρ 、 T_1 、 T_2 の三者がほとんど生体等価である。パラマグネティックイオンやグラファイトの混入が可能で、これによって、 T_1 並びに T_2 を任意に変化させ得る。また、ファントムとしての成形が容易で、十分な強度を持たせ得る。そのため今回の報告で示した如く、Q値をも人体に一致させることが可能となった。懸案の離水等による長期安定性も、上記の材料に比べると比較的優れている³⁾。

以上より筆者らとしては今後、PVAゲルによるファントムの開発に努めると共に、実地での応用を重ねる予定である。そして、本邦のファ

ントム標準化委員会やAAPM、NEMA等において、標準材料の候補として提案して行きたいと考えている。

文 献

- 1) 竹中栄一：2.6画質管理と標準ファントム，in 永井輝男編 MRI診断学—基礎と臨床—。朝倉書店，1988，p.106-115
- 2) 南部昌生：高含水ゴム，高分子加工 32：523-531，1983
- 3) I. Mano, H. Gosima, M. Nanbu, et al.: New polyvinyl alcohol gel material for MRI phantoms. Mag. Res. Med. 3：921-926，1986
- 4) 田中忠蔵，成瀬昭二，堀川和義治，他：中枢神経組織の部位別緩和時間—2種類の異なる磁場強度を用いて—，NMR医学 4(2)：24-31，1984
- 5) 南部昌生：高含水ゴム—医用材料およびNMRファントム—，NMR医学 5(2)：85-90，1985
- 6) 赤井善徳，祐延良治，門田 強，他：MRI用ファントム素材の検討—高級水性樹脂スミカゲルS-50のNMR特性について—，NMR医学 6：282-292，1987
- 7) 竹中栄一，遠藤真広，田中 仁，他：MRI装置の性能評価—プロトン画像の画質評価を中心に—，日磁医誌 7(3)：61-68，1987

A Research of PVA Gel Phantom for MRI Performance Evaluation : Regarding the Gelling Method and Q Value at the Scanning

ISAMU MANO,¹ TOMOKAZU KOBAYASHI²
TOSHIO MORIHIRO,² OSAMU KUWABARA²
KAZUHIKO TSUGITA,³ YOSHIO TSUCHIYA¹

¹*Department of Radiology, Toshiba General Hospital
6-3-22 Higashiooi, Shinagawa, Tokyo, 140*

²*R/D Division, Nippon Oil Company*

³*Nasu Work, Toshiba Medical Systems Division*

The authors have already reported that Polyvinyl Alcohol (PVA) gel has great potential as MRI phantom material. In this paper we report two points, first, regarding the improvement for its gelling process and second, regarding the relationships between phantom shape and the Q value at the scanning.

In the latter it was found that the phantom problem of Q value is able to be overcome with the PVA gel anthropomorphic phantom.