原 著

— RF 加温時のファントム内温度分布の検討 —

伊藤敬三 小野正夫 泉昭生 椎崎信彦
辻 政代 木村俊彦 中島俊文 津村 昌
木田彰雄 光田秀雄 小野山靖人

大阪市立大学医学部放射線科

Study of temperature distribution in agar agar phantom heated by 8MHz RF

Keizo Itoh, Masao Ono, Akio Izumi, Nobuhiko Shiizaki

Masayo Tsuji, Toshihiko Kimura, Toshifumi Nakajima, Masashi Tsumura

Akio Kida, Hideo Mitsuta, and Yasuto Onoyama

Department of Radiology, Osaka City University Medical School

1 - 5 - 7 Asahi-machi, Abenoku, Osaka 545

Abstract

The experimental system to obtain two - dimensional temperature distribution in a phantom was developed. The changes of thermal distribution during and after heating and the dependence of distribution upon the volumes of phantom were investigated. The phantoms were heated with an 8 MHz RF capacitive heating unit with a pair of electrodes of 15 cm in diameter.

1. The temperature distribution tended to become rather uniform due to thermal diffusion with the increase of the heating time and the time after the end of heating. To approximate temperature distribution to SAR (specific absorption rate) distribution, the heating time and the interval between heating and thermometry must be short.

2. The temperature distribution got inhomogeneous with the increase of volume of phantoms heated with similar size electrodes. The standard phantom is necessary to evaluate the equipments and methods of heating.

3. The coefficient of variation of temperature in the phantom was used to express the inhomogeneity of temperature distribution. The values agreed with the visual estimation.

4. For the display of temperature distribution, it is necessary to define the reference point for normalization according to heating methods and equipments. In our paper, the center of a phantom where only a little effect of thermal diffusion was observed, was defined as the reference point.

Key words:

ハイパーサーミア	Hyperthermia
RF 誘電加温	RF capacitive heating
ファントム	Phantom
SAR 分布	SAR distribution

はじめに

Hyperthermia では、生体内温度分布の推定、加温装置の性能評価や加温法の比較改良を行う上で、ファントム内のエネルギー吸収分布 (SAR (specific absorption rate) 分布) を知ることが重要である。

我々は、温度上昇分布と SAR 分布の関係を知らため、ファントム内の 2 次元的温度分布を測定するシステムを用い、加温時間と加温後の時間経過が温度上昇分布に及ぼす影響について検討した。又電極を一定にし、電極とファントムの相対的な大きさを変えた時の分布の相違について、視覚的に又定量的に検討を加えた。

方法および材料

加温装置は、8MHz RF 誘電加温装置 (Thermotron RF -8 山本ビニター社) を用いた。電極は直径15cmで、冷却水の還流は行わず、出力300W (入力-反射波) で室温から加温した。ファントムは0.22% NaCl, 0.1% NaN₃ を含んだ4%寒天 (筋肉等価)¹⁾ の円柱形で、高さ15cmで直径15, 20, 30, 33cmと、直径が25cmで高さが、7, 10, 15, 21cmの8種類である。電極中心軸面にあらかじ

め1cm間隔に温度計を通すために18G針を設置したファントムを作成した (図 1-a)。ファントム内温度測定には、18G針を抜去し、そのあとに温度計プローブ (外径1.06mmのテフロンシースに、素線0.08mm直径のT型熱電対を封入) を挿入しておき、温度計を同時に1cm毎移動し測定した (図 1-b)。この測定に使用した温度計プローブは、測温点 (hot junction) をテフロンシース先端より40cmの点に設置したもので、シース両端を移動枠に固定し多数の温度計が同時にファントム内を移動し計測できるようにした。

温度データは、温度計センサーから digital temperater recoder (TYPE-3874, YOKOGAWA, ELECTRIC) を介してコンピュータ (HP - 9816 HEWLETT PAKARD) に入力し計算処理した。

温度分布は加温前と加温後の温度差により各点の温度上昇を求め、内挿法により等温度上昇曲線を得た。分布表示は、最高温度もしくは、任意の基準点の温度上昇に対する相対値で表示でき、本実験ではファントム中心の温度上昇を100%として表示した。又分布の不均一度を量的に表わすため温度上昇データの平均値と標準偏差を求め、変

a.

b.

図1. 2次元温度分布測定とファントム

a. ファントムと鋳型 (温度計を挿入する為18G針を設置)

b. 1cm間隔に挿入した温度計を1cm毎移動し、電極中心軸面の温度分布を測定する

異係数 $((\text{標準偏差}/\text{平均値}) \times 100)$ を用いて、分布の定量評価を試みた。評価対象は2つの電極にはさまれた部分のファントム内上昇温度とした。

実験結果

1) 熱拡散が温度上昇分布に及ぼす影響

温度上昇分布から SAR 分布を求める時に問題となる熱拡散の影響をみるため、加温時間ならび

に加温中止後の時間と温度上昇分布の変化の関係を検討した。図2は、直径25cm高さ15cmの円柱形ファントムを300Wで5分(a)、10分(b)、20分(c)加温直後の温度上昇分布（ファントム中心での温度上昇を100%）である。(d)はa、b、c、の温度上昇分布の電極中心軸上の温度変化曲線を示したものである。加温時間が長くなると電極近く、すなわち高温部では時間とともに相対的に温度が低下し

図2. 300Wで加温時間を変えた時の温度上昇分布変

化（ファントム中心の温度を100%とする）

a. 5分加温直後, b. 10分加温直後

c. 20分加温直後, d. 温度上昇分布の電極中心軸上の温度曲線

た. 図3は, 300Wで5分間加温の直後(a), 10分後(b), 20分後(c), 40分後(d)に計測した温度分布である. (e)は, a, b, c, dの温度分布の電極中心軸上の温度変化を曲線で示したものである. 加温

後のファントム内の温度変化は高温部で大きく低下した. また(d)のグラフは互いに交叉し, 時間経過につれ低温部では相対的に温度が上昇している. 図4は, 300Wで5分, 10分, 20分加温後の対

図3. 300Wで5分加温後の温度分布の経時的変化

(ファントム中心の温度を100%とする)

a. 加温終了後, b. 10分後, c. 20分後

d. 40分後, e. 温度分布の電極中心軸上の温度曲線

象領域内の最高温度と、ファントム中心温度 (図 4-a), 変異係数の時間経過による分布変化 (図 4-b) を示したものである。最高温度部では, 加温中止後10分で10~20%低下し, 加温時間が長い程変化が小さい傾向がみられた。ファントム中心部では, 温度の時間的変化は少なく, 10分後でも5%以内であった。又, 変異係数は10分間で約3.5~4低下し, 加温時間が長い程係数は小さく分布が均一な事を示している。

2) ファントム容積と温度上昇分布

ファントム容積と電極の大きさの相対的關係が, 温度上昇分布に及ぼす影響を検討するため, 種々な大きさのファントムを300Wで5分間加温直後の温度上昇分布を測定した。図5は, 電極とファントム厚を15cmと一定とし, 電極とファントムの電極接触面の直径比を1(a), 1.33(b), 1.67(c), 2(d), 2.2(e)と変えた時の温度上昇分布 (ファントム中心での温度上昇を100%) を示したものであ

る。直径比が大きくなる程分布は不均一となった。図6は, 電極とファントム直径(25cm)を一定にし, 電極直径とファントム厚の比を0.47(a), 0.66(b), 1(c), 1.4(d)と変えた時の温度上昇分布を示したものである。比が1より小さい場合均一になり, 大きくなる程不均一になる。

図7-aは図5で示した電極とファントム電極接触面の直径比を変えた時の温度上昇分布について, 図7-bは図6で示した電極直径とファントム厚の比を変えた時の電極板にかこまれた範囲の温度上昇分布の不均一度を変異係数を用い数量的に示したものである。電極とファントム直径比が1の時 (図7-a), 係数は約10であるが, 直径比が増加すると共に係数は増加し, 比率が2以上では変化は少なくなった。又, 電極直径とファントム厚さの比が0.47から1.4と大きくなると係数は約20から47と増加し, 分布の不均一度が増加する (図7-b)。

図4. 加温終了後の温度分布の経時的変化(評価領域内)

- a. 最高温度とファントム中心温度変化
- b. 変異係数の時間経過による温度分布変化

図5. 電極直径15cm, ファントム厚さ15cmを一定とし

た時のファントム直径と温度上昇分布の関係

ただし, $R = \frac{\text{ファントム直径}}{\text{電極直径15cm}}$ a. 直径15cm ($R=1$), b. 直径20cm ($R=1.33$), c. 直径25cm ($R=1.67$)d. 直径30cm ($R=2$), e. 直径33cm ($R=2.2$)

図 6. 電極直径15cm, ファントム直径25cmを一定とし

た時のファントム厚と温度上昇分布の関係

ただし, $R = \frac{\text{ファントム直径}}{\text{電極直径 (15cm)}}$

a. 厚さ7 cm ($R=0.47$), b. 厚さ10cm ($R=0.66$)

c. 厚さ15cm ($R=1$), d. 厚さ21cm ($R=1.4$)

図7. 変異係数による温度上昇分布の評価

a. 図5の温度上昇分布評価, b. 図6の温度上昇分布評価

考 察

加温装置の性能表示の目的で、電気的特性を生体に近似させた固形ファントムをかなり長い時間加温し、ファントム内の温度分布を測定する方法が行われてきた。しかし、この種のファントムは、熱特性や血流が無いなどの点で、生体とは異質であり測定された温度分布は、生体内とはかなり相違すると考えられる。したがって、ファントム内温度分布測定の目的は、主として生体内温度分布の推定や加温装置、加温法の相互比較のために必要な SAR 分布を求めるためにある。我々は、SAR 分布を求める手段としてのファントム内温度上昇分布に影響のある諸因子、及びその表示法について検討した。

ファントム内の温度上昇分布は、図2, 3, 4, に示したように加温時間、加温後の経過時間により変化することがわかった。図4-aの加温後の分布内の最高温度が10分後に15から20%低下し、又、その変化率は加温時間が長い程小さく、図4-bの変異係数も小さいことから、加温中及び加温後の熱伝導の影響がかなり大きい事を示している。SAR 分布を得るための条件として、石田、加

藤等は、加温時間は4分以内、温度上昇は3度以下で、温度上昇勾配は3.2度/cm以下と述べている²⁾。したがって、短時間の加温及び、加温後、短時間内に測定を行わないと、温度上昇分布は SAR 分布に一致しないと考えられる。しかし今回の実験では、2次元温度上昇分布を求めるために、ファントム内500点を測定するのに約6分を要し、最高温度が加温後10分で20%低下する事を考えると、加温直後の測定といっても、この条件を十分に満足しているとはいえないが、温度計を1cm毎移動し測定する現在のシステムでは、温度計の時定数が比較的長い事³⁾などを考えると時間の短縮には限界がある。しかし、加温中、加温後の熱拡散を考慮し、適当な条件設定をすれば、温度上昇分布測定により SAR 分布を近似的に求める事は可能と考えられる。

ファントム内の温度上昇分布がファントム容積の増加に従い不均一になる事は理論的にも良く知られているが、今回の検討によって電極の大きさに対してファントムの直径と厚さを変化させた場合の温度上昇分布の変化が視覚的にも定量的にも確認された(図5, 6, 7)。従ってファントム内

温度表示には、加温測定条件及び、ファントム材質の規格化の他、ファントムの形状等の条件の設定が必要な事は明らかであり、標準ファントムの設定が望まれる⁴⁾。

分布評価の定量化は、装置の性能を比較する上でも必要である。従来使用されている等温度上昇曲線の視覚的評価とともに、変異係数は有用な評価法の1つと考えられる。今回の実験では、変異係数で示した数値は視覚的評価とよく一致した。しかし加温方法により温度上昇のパターンは変化し、又サンプリングの条件により数値が変化することから、変異係数による定量的評価の有用性については、さらに検討が必要である。

温度上昇分布を視覚的に評価するためには、表示方法が重要で、従来最高値を100%とし、相対値で表わされてきた。しかし、加温中止後の最高温度は急激に変化(10分後、20%低下)し、かつ最高温度を示す点が刻々と変化する事を考えると最高温度を基準にすることは適当とは言いがたい。我々は今回温度変化の少ないファントム中心の温度上昇を100%とした相対値で表示した。この分布表示法は、深部加温の場合には極めて有用と考えられる。しかし、電極の組合せ等により、ファントム中心部の温度上昇がない場合や、マイクロ波加温では適用できない。温度上昇分布の測定には、赤外線サーモグラフィも使用されるが³⁾⁵⁾、この場合にも時間的な遅れはあり、測定面を室温に曝露する事からも、最高温度の変化は無視できない。したがって、温度上昇分布表示の基準点を技術的にどの様に定義するかは、今後さらに検討を要する問題である。

まとめ

- 1) 加温及び測定時間を短くする事で、温度上昇分布はエネルギー吸収分布(SAR分布)に近似する。
- 2) ファントム温度上昇分布は、電極とファントムの大きさの相対比により変化し、電極に対してファントムが大きくなると、分布は不均一になる。したがって、標準ファントムの設定が必要で

ある。

- 3) 分布の不均一度を示す方法として変異係数を用いたが、変異係数による数量的評価は視覚的評価とよく一致した。

- 4) 温度上昇表示の基準点として、経時的变化の少ないファントム中心温度を使用し、深部加温での有用性を確認した。加温法により適当な基準点を定義する必要がある。

本研究は文部省科学研究費補助金(がん特1)ならびに厚生省がん研究助成金によって行われた。

文 献

- 1) 加藤博和, 菅原努 1, 理工学的側面ハイパーサーミア〈癌治療の新しい方法〉菅原努, 阿部光幸編pp. 31 - 53, 1984. マグプロス出版
- 2) Ishida, T. Kato, H. Miyakoshi, J. Furukawa, M. Ohsaki, S. and Kano, E.: Physical Basis of RF Hyperthermia for Cancer Therapy (1) Measurement for Distribution in Absorbed Power from Radiofrequency Exposure in Agar Phantom. J. Radiat. Res., 21: 180 - 189, 1980.
- 3) Nakajima, T. Tsumura, M. and Onoyama, Y.: Clinical experience with hyperthermia in cancer radiotherapy: Special reference to in Vivo thermometry. In "Modification of Radiosensitivity in Cancer Treatment" (T. Sugahara ed.), pp. 381 - 414 1984. Academic Press.
- 4) 斉藤正男. 加温方法. ハイパーサーミア〈癌治療の新しい方法〉菅原努, 阿部光幸編. pp 327 - 340, 1984. マグプロス出版
- 5) Guy, A. W.: Analyses of electromagnetic fields induced in biological tissues by thermographic studies on equivalent phantom models. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 19: 205 - 214, 1971.