ハイパーサーミア用ソフトヒーティング素子の性能評価

Evaluation of Performance of Soft Heating Element for Local Hyperthermia

家名田敏昭・松木英敏*・佐藤知矢**・村上孝一***・菊地新喜・星野俊明**

東北学院大学工学部電気工学科, 多賀城市中央 1-13-1 (☎985)

*東北大学工学部電気工学科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (☎980)

**福島県立医科大学放射線科, 福島市光が丘 1 番地 (☎960)

***八戸工業大学, 八戸市大字妙字大開 88-1 (☎031)

T. Yanada, H. Matsuki*, T. Satoh**, K. Murakami***, S. Kikuchi and T. Hoshino**

Dept. of Elect. Engng., Tohoku Gakuin Univ., 13-1, Chuo 1-chome, Tagajo 985

*Dept. of Elect. Engng., Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980

**Dept. of Radiology, Fukushima Medical College, Hikarigaoka 1-banchi, Fukushima 960

***Hachinohe Inst. of Tech., 88-1 Oobiraki, Ooaza Myo, Hachinohe 031

The soft heating method is an induction heating method utilizing temperature sensitive magnetic materials implanted inside a body. In this method, the Curie temperature is the reference temperature and the generation of heat is controlled automatically. In this paper, we evaluate the performance of three kinds of soft heating elements: temperature sensitive ferrite rod as a hybrid device, ferrite powders and temperature sensitive Fe-P-C-Cr amorphous metal flakes. The ferrite rod will be applicable to tumors in rectum or vagina and the the amorphous metal flakes to deep seated tumors.

Key words: hyperthermia, soft heating, induction heating, Curie temperature, temperature sensitive magnetic materials, ferrite, amorphous

1. ま え が き

悪性腫瘍細胞と正常細胞との間に熱感受性の差異が存在することに着目し, 生体の温度を体温より 5~6 deg. 上昇させ, 悪性腫瘍細胞を選択的に死滅またはその増殖を阻止しようとするハイパーサーミアが, 癌治療あるいは脳腫瘍治療の方法の一つとして注目されている. 近年, 生体内に配置した磁性体に, 高周波交番磁界を印加して生じる磁性体の鉄損を発熱源とし, 加温される周囲の温度を磁性体の透磁率の温度特性を利用して, 制御しようとするソフトヒーティング法が開発されてハイパーサーミアへの応用が期待されている.

これまで筆者らは, ハイパーサーミア用ソフトヒーティング素子として, 種々の構造, 形状を有する発熱体を提案し, 報告してきた^{1)~4)}. 今回, これら発熱体について, 性能を統一的に評価し, 特性改善ならびに実用化に

関する指針を得ることを目的とし実験および検討を行ったところ, 実用に際し有用と思われる所見が得られた. 本論文はこれらの結果について述べるものである.

2. 試 料

Table 1 に今回比較検討を行ったソフトヒーティング素子(発熱体)の種類, 大きさ, およびキュリー温度(T_c)を示す. 同表中, フェライト粉³⁾については, 透磁率は温度の上昇に対し直線的に減少するが, キュリー温度は, 対象となる温感範囲に存在しないため示していない. また, フェライト粉には外径 8 mm×内径 6 mm×長さ 6 mm の銅, アルミニウム, 黄銅の非磁性金属環のうち 1 個を印加磁界に対し平行に埋め込んで使用した. 感温アモルファスフレーク^{4), 5)}の成分組成は, 5 者とも Fe-P-C-Cr である.

3. 発熱体の特性ならびに性能評価

3.1 感温フェラトロッド

現在開発されているソフトヒーティング素子として

Table 1 Samples used in experiment

sample	class	size *	T_c [°C]
ferrite rod	—	4mmφ×30mm	43.0, 50.0
ferrite powder	—	≈10μm	—
amorphous flake	#1	63μm~149μm	46.5
	#2	149μm~297μm	45.0
	#3	297μm~500μm	44.5
	#4	500μm~1000μm	44.5
	#5	1000μm~	42.5

* Diameter x length (ferrite rod), particle size (ferrite powder), and flake length (amorphous flake).

Fig. 1 Temperature dependence of apparent relative permeability μ_r' of temperature sensitive ferrite rod.

Fig. 2 The change of lines of magnetic force with temperature.

は、最も実用化に近い存在であり、臨床応用も検討されている発熱体である。

Fig. 1 にキュリー温度 50°C の感温フェライトロッド (以下、ロッドと称す)^{1), 2)} の見かけの比透磁率の温度特性を示す。同図よりキュリー温度近傍で見かけの比透磁率が急峻に減少していることが分かる。Fig. 2 は、複合形発熱体の温度による磁力線の変化を定性的に示した図である。ここで、複合形発熱体とはロッドとこれに蒸着した長さ 20 mm、厚さ 10 μ m の銅箔 (以下、銅環と称す) により形成された発熱体のことである。同図に示すように、複合形発熱体の温度がキュリー温度以下では、銅環を鎖交する磁束量が極めて大きく、銅環に誘導電流が流れ、そのジュール熱によって温度は上昇する。一方、複合形発熱体の温度がキュリー温度以上になると、ロッドは強磁性特性を失い、銅環を鎖交する磁束量も減少するため発熱量は減少し温度上昇は抑制されることになる。したがって、温度制御回路を付加することなく、定温加熱を行えることになる。Fig. 3 はこのことを実験的に確かめた結果である。周波数 43.7 kHz、強度 2.0 kA/m の交番磁場中にスチール製の虫ピン、外径 4 mm、長さ 20 mm、厚さ 20 μ m の非磁性金属環、キュリー温度

Fig. 3 Temperature change of various materials. (Stainless steel, metal ring, ferrite rod $T_c = 44$ [°C] and hybrid device.)

44°C のロッド、および複合形発熱体をそれぞれおいた場合の温度上昇を測定した。同図をみると、ロッド単体ではその鉄損が小さいために発熱量は小さく、温度は約 2°C しか上昇していないことがわかる。また、金属環単体の場合も鎖交磁束量が少なく、温度上昇は約 3°C に留まっているが、複合形発熱体においては、励磁直後の温度上昇はスチール製の虫ピンと同程度でありながら、ロッドのキュリー温度近傍で温度が自動的に制御されているのが認められる。Fig. 4 は、複合形発熱体 ($T_c = 43$ °C) の発熱特性を大気中およびイヌの直腸内で比較した図である。これをみると、加温を開始する際の初期温度が異なる大気中、および直腸内のいずれでも温度は 43°C に制御されており、加温開始直後の温度上昇も速く、約 30 秒でキュリー温度に達していることなどが分かる。

3.2 フェライト粉

加温部位に応じて発熱体の形状を変化できれば、ハイパーサーミアとしての適用部位の拡大が可能になると考え、粉末形状を有する磁性体に着目し検討を行った。

Fig. 5 は周波数 100 kHz、強度 2.0 kA/m の交番磁場中で各発熱体を 30 分励磁した場合の発熱特性である。これをみると、フェライト粉 (以下パウダーと称す) のみでも温度は 42°C に達しているが、形状に依存する見かけの比透磁率が低いため温度上昇速度が遅く、実用化するには特性の改善が必要であると考えられる。そこで、パウダー中に非磁性金属環を埋め込み、そのうず電流損を併用することで特性の改善を試みた。金属環を併用することにより加温開始直後の温度上昇速度の改善は認められるが、現在の材料では、未だ不十分であり、材料自身の改善が必要であると考えられる。特にパウダーの形状について検討し、見かけの比透磁率を高めることが必要である。また、実験に用いたパウダーの透磁率が温度に対し急峻に変化しないため金属を鎖交する磁束の

Fig. 4 Temperature change of hybrid device in the air and in the rectum of dog.

Fig. 5 Temperature change of ferrite powder and ferrite powder with four kinds of metal rings.

変化量が少なく、結果として到達温度が高くなっていることが了解される。

3.3 感温アモルファスフレーク

温度制御を行う粉末のキュリー温度以下における見かけの比透磁率の増加、および金属環と鎖交する磁束量の増大を図り、発熱体の形状任意性を高めるには金属環の代わりに微小金属片の使用が望ましいと考えられる。そこで、感温アモルファスフレーク（以下、フレークと称す）に着目し検討を行った。これを発熱体として用いれば、見かけの比透磁率の増大のみならず、金属環と同様の発熱効果も期待できると考えられる。またフレークはロッドと異なり、磁束の集中および発熱を一つの材料で行えるという特徴を有している。

Fig. 6 は、パウダーと同一条件下で測定したフレークの発熱特性である。同図中 α は、見かけの体積に占めるフレークの体積の割合を示す体積充てん率として定義した値である。これを見ると到達温度は体積充てん率の高い #1 が最も高く、体積充てん率が低くなるに従って到

Fig. 6 Temperature change of five kinds of temperature sensitive amorphous metal flakes.

Fig. 7 Temperature change of mixtures of two kinds of temperature sensitive amorphous metal flakes. (#4 and #1, #4 and #2, #4 and #3.)

達温度も低くなる傾向にあることが認められるほか、#4, #5 などは到達温度が 40~41°C と低く、ハイパーサーミアに要求される温度に達しておらず、特性の改善が必要であると考えられる。また加温開始直後の温度上昇速度は、体積充てん率が低く、フレーク長が長い #5 が最大となっていることがわかる。そこで、フレーク長の長い #4 に #1~#3 のフレークを混合した発熱体を使用することにより発熱体の体積充てん率を高くし、到達温度を高くすることを目的とし検討を行った。その結果を Fig. 7 に示す。Fig. 6 の #4 の特性と比較すると到達温度が約 42°C になっており、フレーク同士を混合することによって到達温度をキュリー温度に近づけることが可能になった。しかしながら、温度が未だフレークのキュリー温度より低い温度で制御されていることが分かる。これは素子内部に温度分布が存在しやすく、体積充てん率が温度の上昇とともに見かけ上低下する傾向にあることなどによると考えられる。したがって、過熱は防止される方向であり、安全性は高いといえる。

Table 2 Evaluation of performance of three kinds of heaters

	ferrite rod	ferrite powder	amorphous flake
temperature rising speed	◎	×	○
temperature controllability	◎	△	○
variety in shape of heater	×	△	◎
easiness of excitation	×	×	◎
application	carcinoma of the rectum or vagina	—————	deep seated malignant tumors

3.4 特性および性能評価

Table 2 に各発熱体の特徴を比較して示す。まず温度上昇速度に関しては、ロッドが最も優れており、パウダー、フレークは温度上昇速度は遅いが、それぞれ改善策を施すことによってロッドの特性にある程度近づけることが可能である。また、温度制御特性に関しても同様のことが適用できる。さらに、発熱体の形状任意性はフレークが最も自由度があり、発熱体に対する磁界の印加角度については、ロッドやパウダーが金属環を併用していることから、この金属環と平行に磁界を印加しなければならないという制約を受けるのに対し、フレークでは任意の角度から磁界を印加可能であるという特徴を有しており、励磁装置の小型化や電源装置の負荷の軽減が図れると考えられる。

4. ま と め

以上、ソフトヒーティング素子の性能評価について述

べた。その結果、直腸、腹腔などの管腔内の加温には、ロッドが適しており、臨床応用の可能性が高いことがわかった。また生体深部の広範な領域の加温、あるいは組織内加温には、フレークが適していると考えられるが、さらなる特性の改善が必要であると考えられる。

文 献

- 1) H. Matsuki, K. Murakami, T. Satoh and T. Hoshino: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 2440 (1987).
- 2) 松木, 村上: 日本応用磁気学会誌, **8**, 225 (1984).
- 3) 安藤, 松木, 山口, 村上: 日本応用磁気学会誌, **12**, 423 (1988).
- 4) 松木, 家名田, 菊地, 山口, 村上: 日本応用磁気学会誌, **13**, 449 (1989).
- 5) H. Ishii, M. Naka and T. Masumoto: *Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals*, 35 (1982).

1990年1月8日受理, 1990年3月13日採録