感温アモルファスフレークを用いたソフトヒーティング法の基礎的検討

Characteristics of Soft Heating Method Using Temperature Sensitive Amorphous Flakes

松木英敏・家名田敏昭*・菊地新喜*・山口正洋**・村上孝一

東北大学工学部電気工学科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980)

*東北学院大学工学部電気工学科, 多賀城市中央 1-13-1 (〒985)

**東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980)

H. Matsuki, T. Yanada*, S. Kikuchi*, M. Yamaguchi** and K. Murakami

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

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

**Res. Inst. of Elect. Comm., Tohoku Univ., 1-1, Katahira 1-chome, Aoba-ku, Sendai 980

The soft heating method is an induction heating utilizing temperature sensitive magnetic materials implanted inside the tissue. In this method, the Curie temperature acts as a reference temperature. In this paper we propose a soft heating element made of temperature sensitive amorphous flakes in order to heat deep-seated tumors effectively. We furthermore discuss heating characteristics of a mixture of amorphous flakes and ferrite powders.

1. 緒 言

近年になって、生体内に埋め込んだ低キュリー温度の感温磁性体に外部より高周波交番磁界を印加して、磁性体を発熱させ、加温させる周囲の温度を磁性体のキュリー温度で制御しようとするソフトヒーティング法が開発され^{1)~4)}。悪性腫瘍に対するハイパーサーミアの効果的な方法の一つとして注目されている。このソフトヒーティング法では、生体内に埋め込まれた磁性体を使用するため局所的かつ深部加温が可能となる特徴を有するが、より効果的な加温を行うためには、磁性体を加温部位に応じた形状にすることが望ましいと考えられる。先に筆者らは、形状に自由度のある発熱体として感温磁性粉と金属環を用いる方法を提案し⁵⁾、磁性粉のみでは見掛けの実効比透磁率が大幅に低下し発熱量の低下を招くが、微小金属環の併用により発熱特性を改善できることを報告した。本方式においてハイパーサーミアとしての高効率化を図るには、金属環と鎖交する磁束量の増大並びにその温度制御を行う感温磁性粉のキュリー温度以下における実効比透磁率を高める必要があると考えられる。他、発熱素子の形状任意性を高めるため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。

そこで筆者らは、フレーク形状を有する感温アモルファスフレーク磁性材料（以下、感温アモルファスフ

レークと称する）に着目し、これを感温磁性粉として用いれば、実効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、種々の実験的検討を行った。

その結果、感温アモルファスフレークのみでも加温は可能であること、フェライト粉など、形状、材質の異なる磁性粉との混合粉の使用によって発熱特性および温度制御特性の改善が可能であることなど、実用に際し有用と思われる結果が得られた。本論文はこれらの結果について述べるものである。

2. 感温アモルファスフレークの発熱特性

Fig. 1 に本研究で使用した 4 種類の Fe-P-Cr 系感温アモルファスフレーク（#1~#4）の形状およびフレーク長を示す。Fig. 2 は感温アモルファスフレークを円筒状あるいは平板状の容器に充てんした場合の平均フレーク長 l と体積充てん率 α との関係を示した図である。ここで、体積充てん率は、容器体積に占める感温アモルファスフレークの総体積の割合として定義した。同図よりフレーク長が長くなるにつれて、体積充てん率は減少するが、容器形状の影響はさほど受けていないことが了解される。Fig. 3 に感温アモルファスフレークを充てんしたガラス管（直径 6 mm, 長さ 50 mm）を磁心として用いたときのインダクタンスの温度特性を示した。

Fig. 1 Outlook of amorphous flakes.

Fig. 2 Relation between packing density α and flake length l .

Fig. 3 Temperature dependence of inductance L of a tube filled with flakes.

このインダクタンスは実効比透磁率に比例する量である⁴⁾。同図よりキュリー温度は約 45°C であること、#4 磁心のように体積充てん率が小さくフレーク長が長いもののほど、温度に対してインダクタンスが急峻に変化していることがわかる。Fig. 3 に示されるようなインダクタンスの温度特性を Fig. 4 に示す 3 直線で近似し、キュリー温度前後でのインダクタンスの温度に対する変化の割合 $(L_2/L_1)/(T_2-T_1)$ を $(\Delta L/\Delta T)$ と表すことにする。

#1~#4 の試料を、周波数 100 kHz、強度 2.0 kA/m の交番磁界で励磁したときの発熱特性を Fig. 5 に示す。これをみると、体積充てん率の小さいものほど加温開始直後の立ち上がりが鋭くなり、早く温度平衡状態に達していることがわかる。また最終到達温度（励磁開始 30 分後の温度）は体積充てん率の大きい方が高くなっている。さらに、最終到達温度が 43°C 前後であることよりキュリー温度によって温度制御が行なわれていると考えられる。本研究で理想とされる発熱特性は、立ち上がりが鋭く、ハイパーサーミアに要求される 43°C にすみやかに達する特性であり、4 種類中ではフレーク長の最も

Fig. 4 Definition of $(\Delta L/\Delta T)$.

Fig. 5 Temperature change of four kinds of amorphous flakes.

長い試料 #4 が理想特性に近いものとなっている。しかしながら試料 #4 はフレーク長が長く、体積充てん率が低いために小型化には適さない。

そこでフレーク長の短いもので特性改善を行うために他の粉末との混合を考えた。Fig. 6 は、試料 #3 に混合させる粉末として粒径 10 μm 程度の感温フェライト粉⁵⁾を使用し、#3 の体積充てん率を変化させた場合のインダクタンスの温度特性である。体積充てん率の増加によってインダクタンス値が増加し、 $(\Delta L/\Delta T)$ の絶対値が増加していることがわかる。またキュリー温度以上のインダクタンス値はほぼ一定となっている。このことより温度平衡に達した後の特性改善が予想される。Fig. 7 は試料 #3 に混合する粉末として粒径 50~100 μm 程度の絶縁粉（砂糖の結晶）、フェライト粉および鉄粉（粒径約 10 μm）を使用したときの体積充てん率と $(\Delta L/\Delta T)$ の関係について示した図である。絶縁粉およびフェライト粉では、体積充てん率の増加に伴い $(\Delta L/\Delta T)$ が増加しているが、鉄粉では体積充てん率 0.3 のときに最大値を示している。体積充てん率を変化させ $(\Delta L/\Delta T)$ の値を任意に選択することによって効率的な加温が可能になると推測できる。さらに、混合する粉末の磁気特性によって、発熱特性が影響されると考えられる。Fig. 8

Fig. 6 Temperature dependence of inductance L of mixtures of the flakes and ferrite powders.

Fig. 7 Relationship between packing density α and $(\Delta L/\Delta T)$.

Fig. 8 Temperature change of four kinds of amorphous flakes with ferrite powders.

は、#1～#4 にフェライト粉を混合し、体積充てん率を #1 では 0.32, #2 では 0.30, #3 では 0.25, #4 では 0.16 とした場合の発熱特性である。これを見ると #2, #3, #4 の最終到達温度がほぼ等しいことがわかる。このことより適当な体積充てん率を有する感温アモルファスフレークとフェライト粉の混合粉を使用すれば、発熱特性を改善できることが示唆される。

3. 感温アモルファスフレークの発熱量

感温アモルファスフレークの発熱量の測定を行うために、感温アモルファスフレークと水の混合物を、周波数 100 kHz, 強度 2.0 kA/m の交番磁界で励磁し、その温度上昇を測定した。測定は、周囲を発泡スチロールで被った長さ 83 mm, 直径 12 mm の円筒状容器に混合物を封入し、断熱状態で行った。Fig. 9 は感温アモルファスフレークのフレーク長 l と総発熱量 P およびフレーク単位体積当たりの発熱量 P_v との関係を示したものである。これを見ると総発熱量 P はフレーク長が短いほど多いが、単位体積当たりの発熱量 P_v はフレーク長の長い方が多く、#4 の P_v は、#1 の P_v の約 2 倍あることが了解される。次に、発熱量と磁界の強さとの関係を調べるために、周波数を 100 kHz 一定とし、磁界の強さを 1.5, 2.0, 2.5 kA/m と変化させた場合について同様の実験を行った。その結果を、磁界の強さと単位体積当たりの発熱量 P_v との関係として Fig. 10(a) に示す。同図より励磁磁界の強さが大きくなるにつれて発熱量が 2 次関数的に増加していることがわかる。Fig. 10(b) は試料 #3 を使用し、磁界の強さを 2.0 kA/m 一定とし、周波数を 20, 50, 70, 100 kHz と変化させた場合の発熱量と励磁周波数との関係について示した図である。これを見ると、

Fig. 9 Flake size dependence of calorific power P and of calorific power per unit volume P_v (cylindrical shape).

Fig. 10 (a) Calorific power per unit volume vs. intensity of magnetic field H relation. (b) Calorific power characteristics. P is calorific power, and P_v is calorific power per unit volume.

Fig. 11 Flake size dependences of calorific power P and calorific power per unit volume P_v (planer shape).

励磁周波数が高くなるにつれて、発熱量がほぼ直線的に増加していることがわかる。Fig. 11 は 7 mm × 40 mm × 2 mm の平板状容器を用い、周波数 100 kHz、強度 2.0 kA/m の交番磁界で励磁した場合の各試料における発熱量である。Fig. 9 と比較すると発熱量が著しく増加していることがわかる。これは、容器全体としての反磁界が減少し、感温アモルファスフレークに有効に作用する磁界が増加していることによると考えられる。

4. 結 言

以上、感温アモルファスフレークを用いたソフトヒーティング法について実験的に検討し、感温アモルファスフレークのみで加温が可能であるが、フレークの体積充てん率が発熱特性に強く影響を与えることを明らかにした。さらに感温アモルファスフレークとフェライト粉の複合形発熱体を使用すれば、磁束の収束率を高め温度制御特性並びに発熱特性を改善できることなど、感温アモルファスフレークを用いた方法が実用上有用であるとの見通しが得られた。発熱量の算定法並びに素子の設計については今後の検討課題である。

謝 辞

試料を提供していただいた(株)リケンに深謝する。

文 献

- 1) H. Matsuki, K. Murakami and H. Niizuma: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-18**, 1788 (1982).
- 2) H. Matsuki and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 1927 (1985).
- 3) H. Matsuki, K. Murakami, T. Satoh and T. Hoshino: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 2440 (1987).
- 4) 松木, 村上: 日本応用磁気学会誌, **8**, 225 (1984).
- 5) 安藤, 松木, 山口, 村上: 日本応用磁気学会誌, **12**, 432 (1988).

1988年11月22日受理, 1989年2月10日採録