

## 磁気シートで構成したバックヨーク付医療用磁界発生装置の研究

## Applicator Added Back Yoke Composed of Magnetic Sheet for Hyperthermia Therapy

山田 外史<sup>\*1</sup>(正員), 池畑 芳雄<sup>\*1</sup>, 林 亮平<sup>\*1</sup>Sotoshi YAMADA<sup>\*1</sup>(Mem), Yoshio IKEHATA<sup>\*1</sup>, Ryohei HAYASHI<sup>\*1</sup>

Induction heating type hyperthermia treatment needs both high magnetic fields ( $> 2$  mT) and a few hundred kHz inside of a body to heat magnetic particles and implant materials up to  $43^{\circ}\text{C}$ . We proposed the double-pancake type coils sandwiching human body. The exciting coils of human scale could generate magnetic fields with both magnitude and frequency required to a medical treatment. In order to make magnetic fields inside a deep body further increase, we proposed that a back yoke as magnetic materials was added to both coils. The paper discussed magnetic- and electrical-circuit characteristics of the coils with a magnetic sheet and ferrite as back yoke.

**Keywords:** hyperthermia treatment, induction heating, back yoke, magnetic sheet, ferrite, equivalent resistance

## 1 緒言

がん温熱治療法の1つに、誘導加温形温熱治療法(hyperthermia therapy)がある<sup>[1],[2]</sup>。加温のためには、体外の励磁コイル(磁界発生装置, Applicator)により、腫瘍のある体内深部、すなわち表皮から12-14 cm(体型に依存する)において、高周波(100 - 200 kHz)、磁界レベル( $>200$  kHz·mT)を発生させる必要がある<sup>[3]</sup>。

体深部での磁界増大を目指すため、2個の平面励磁コイルにて患者の体を挟み込み、発生磁界を重ね合わせ磁界を印加するダブルパンケーキ形励磁コイル装置を提案し、さらにワイヤレス給電によりコイル間の接続を排除したことで印加電圧、生体に印加する電界を減少させた。また、コイルの可動性が向上し、様々な位置の患部、体型に合わせる事が容易となった<sup>[4]-[7]</sup>。

本研究は、基本的な励磁システムを変更せずに体深部でのさらなる磁界増強と励磁コイルの外側に発生している漏れ磁界を減少させるため、バックヨークを励磁コイルに付加した。バックヨークには従来フェライトを使用したのが、今回軽量の磁気シートを使用し比較検証を行った<sup>[8]</sup>。2種類のバックヨークを付加した場合の磁界分布、磁界発生装置の等価回路のパラメータの変化について評価したので報告する。

連絡先: 山田外史, 920 1192 金沢市角間町, 金沢大学  
環日本海域環境研究センター  
e-mail: syamada@staff.kanazawa-u.ac.jp

<sup>\*1</sup> 金沢大学

## 2 バックヨーク付パンケーキコイル

## 2.1 バックヨーク付ダブルパンケーキ形コイルの構成

誘導加温形温熱治療法は、がん患部に注入した磁性微粒子に効果的に高周波磁界を印加し、ヒステリシス損による発熱量を増やすことが必要である。磁界が減衰する体深部での磁界強度の増大、様々な体形の患者への対応を実現するため、Fig. 1に示すように2個の平面励磁コイルで患者を挟み込むダブルパンケーキ形励磁コイルを構成した<sup>[6],[7]</sup>。また、Fig. 2に示すように励磁コイル寸法は実用規模に近い形状となっており、日本人の体形に合わせてコイル間  $g = 280$  mm, コイル外径  $d = 360$  mmである。励磁コイルにはリッツ線束(素線径 $0.06\mu\text{m}$ , 250本束)を24本で紐状に編んだものを使用し、中空の形状で直径は約10 mmである。このコイルを冷却用サクシオンホースに挿入し、 $N = 5$  turnsのスパイラルコイルの平面形励磁コイルを作製した。励磁コイルの電流容量は、周波数 $f = 100$  kHzで液冷却時最大 $J_{max} = 400$  Aである。

Fig. 3に示すように患者の体を挟むような平面励磁コイル構成にすることでコイルの一方を上下左右に動かすことができ、様々な位置のがん患部や体形に合わせてコイル位置、間隔の調整ができ施術時に患者が装置に合わせて移動する必要のない装置構成となる。ただし、開磁路構成であるので漏れ磁束、磁界の均一性に劣ることが欠点である。

Fig. 4 に示すようにバックヨークの有無の場合について磁界発生装置の磁界分布を数値解析した。一般にパンケーキ形のような平面コイルでは Fig. 4(a)に示すように磁界はコイル間では減衰していくことは明らかで、かつ上下コイルの外側に漏れ磁界が多い分布となっている。よってコイル間の磁界を増強、外側の漏れ磁界を減少させるために平面励磁コイルの外側に Fig. 4(b)に示すように上下コイルの外側にバックヨークを設置したところ、コイル間の磁界は増強し、外側のもれ磁界は減少した。

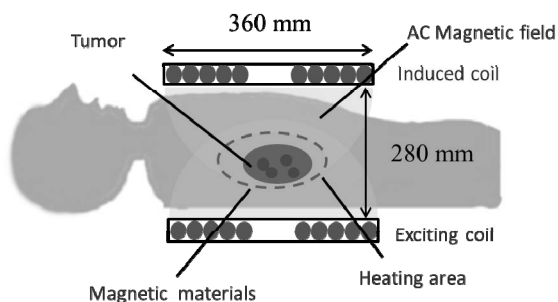


Fig. 1 Double-pancake exciting coil.

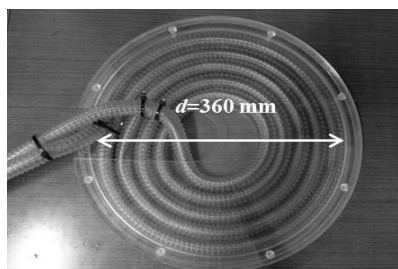
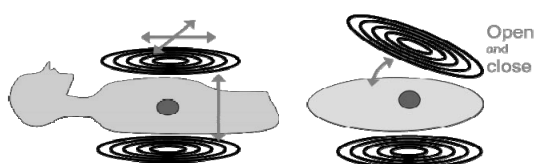
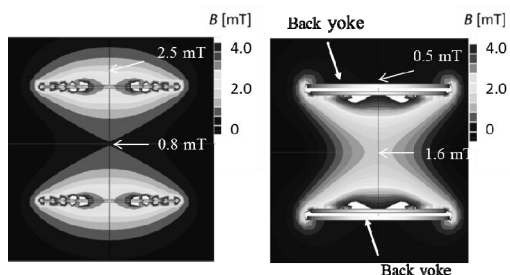


Fig. 2 Pancake exciting coil.



(a) Change of position. (b) Change of inclination

Fig. 3 Position adjustment of pancake coils.



(a) Without back yoke. (b) With back yoke.

Fig. 4 Distribution of magnetic fields. ( $I_{rms}=100$  A)

## 2.2 フェライトおよび磁気シートで構成したバックヨーク

温熱療法の励磁周波数  $f=100$  kHz 以上であることを考慮して、フェライト磁心にてバックヨークを構成した。ただし、フェライトの製作上で本コイルを覆う大きさの形状の作製が困難であること、衝撃に弱く軽量化のため薄くできないなどの点から Fig. 5 のような扇形の磁心を作製し、複数枚用いて励磁コイルを全面 ( $m=8$  枚必要) または一部覆う ( $m < 8$ ) ように構成した。

一方、磁気シートは金属磁性体粉末をゴムや樹脂などに分散・混合しシート化した柔軟性のある材料である。Fig. 6(a)に磁気シート(Busteraid<sup>®</sup>)の写真を示す<sup>[9]</sup>。磁気シートは、非常に薄く柔軟性があり加工が容易であり、また装置の軽量化が可能である。磁気シートで作製したバックヨークを Fig. 6(b)に示す。Fig. 6(b)に示すバックヨークは、厚さ 1.8 mm、重量 530 g であった。磁気シートは磁性体の含有率が低いフェライトに比べて比透磁率が低い。Table 1 にフェライトと磁気シートの特性を比較した。

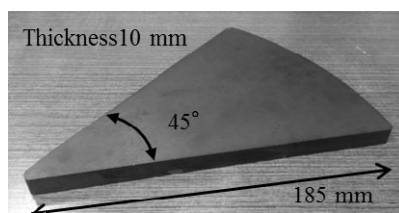
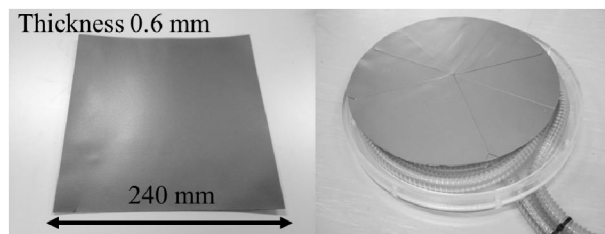


Fig. 5 MnZn ferrite core of fan shape.



(a) Magnetic sheet (NEC/TOKIN, Busteraid EFX<sup>®</sup>)

Fig. 6 Back yoke composed of magnetic sheet.

Table 1. Comparison between ferrite and magnetic sheet.

	Ferrite	Magnetic sheet
Specific [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	4.8~4.9	2.8~3.2
Relative permeability	2,250 at 100kHz	100 at 1 MHz
Weight	660 g / fan shape	105 g / sheet

### 3 バックヨーク付コイルの電気・磁気特性の比較

#### 3.1 磁気分布と磁界増強

Fig. 7 は、磁気シートを付加したコイル間の中心軸上(z 軸)の磁界分布を測定した結果であり、磁界の増強効果を評価した。バックヨークの有無を実験的比較した結果、コイル間の中心の磁界が厚さ  $d=1.8\text{ mm}$  のとき 30 %、厚さ  $d=3.6\text{ mm}$  のとき 40 % 増加することを確認した。バックヨークの厚さを倍にした場合、磁界が 10 % しか増加しなかったのは磁界発生装置の磁気回路が本質的に開磁路となっているためである。同様に、Fig. 8 に示すようにバックヨーク上部における漏れ磁界について測定した。バックヨークの有無を比較した結果、局所的に最大で厚さ  $d=1.8\text{ mm}$  のとき 60 %、 $d=3.6\text{ mm}$  のとき磁束密度が 70 % 減少することが明らかとなった。Fig. 9 は、フェライト磁心を励磁コイルに付加した構成を表しており、磁心の枚数  $m=8$  にて励磁コイル全面を覆う形状となっている。Fig.9(a) はフェライト磁心を 6 枚付加した状態を表しており、フェライト磁心の枚数は  $m=6$ (1 枚  $45^\circ$  の磁心がコイルを占める占有角度は  $45 \times 6=270^\circ$ ) となる。一方、Fig.9(b) はフェライト磁心を 3 枚付加した状態を表しており、フェライト磁心の枚数は  $m=3$  となる。磁心で励磁コイル全面を覆うのではなく一部のみを覆うことで、重量を減らしバックヨークの目的が達するので、Fig.10 のように磁心の付加する枚数  $m$  を変え測定を行った。

Fig. 10(a) は、フェライトを付加した際のコイル間の磁界の増強効果を測定したもので、バックヨークの有無について比較するとコイル間の中心で磁界が 50 % 増加し、磁心の枚数  $m=3, 6$  では磁束密度に大差なく同じ増強効果が得られた。Fig. 10(b) は、バックヨーク上部の磁界減少効果を測定した結果で磁界は最大 75 % 減少した。しかしながら磁心の枚数  $m=3$  では、磁心と磁心の空隙が大きく空隙から漏れ磁界が発生していた。磁心の枚数が少ないと磁心上と空隙上で磁界分布に差が発生し不均一となる。

フェライトと磁気シートでの発生磁界の特性の比較を Table 2 にまとめた。表より磁気シートでの磁界増強・減少効果は、フェライトに 10 % 程度劣る結果となった。しかしながら、フェライトに比べて軽い材料であること、柔軟性に優れ加工性が良いこと、励磁コイル全面を覆うことが可能であるといった機能性を考慮した場合、機能性の利点が多い。

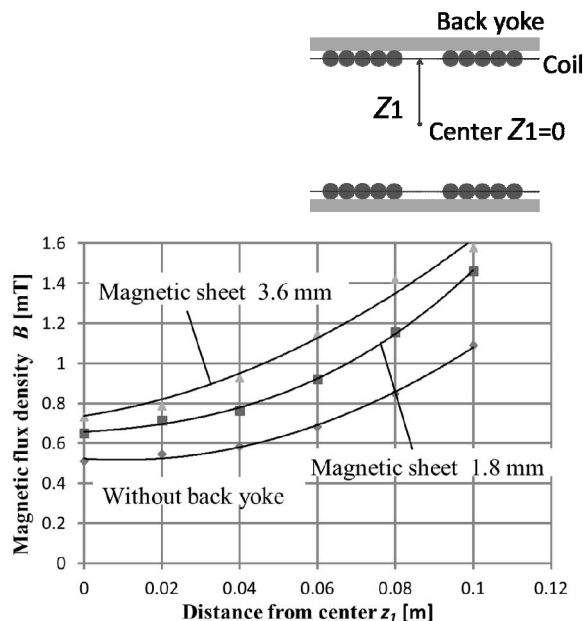


Fig. 7 Magnetic distribution between pancake coils.

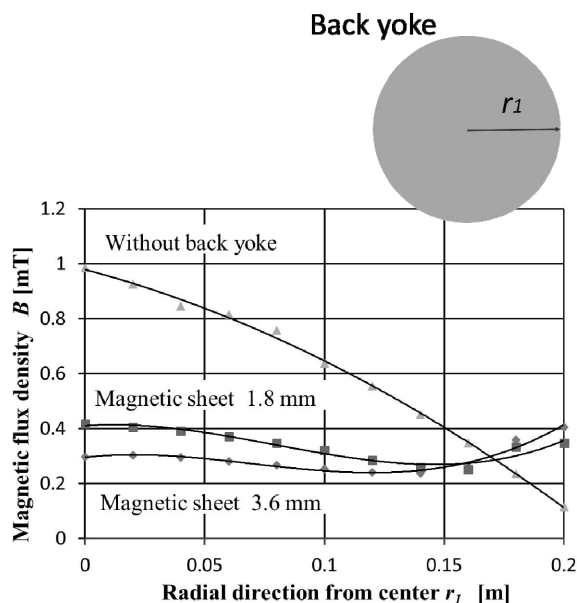
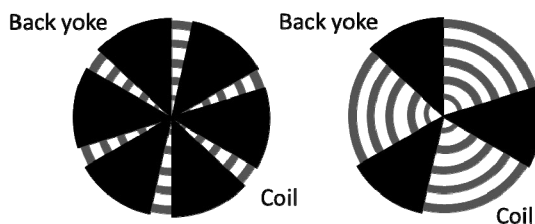
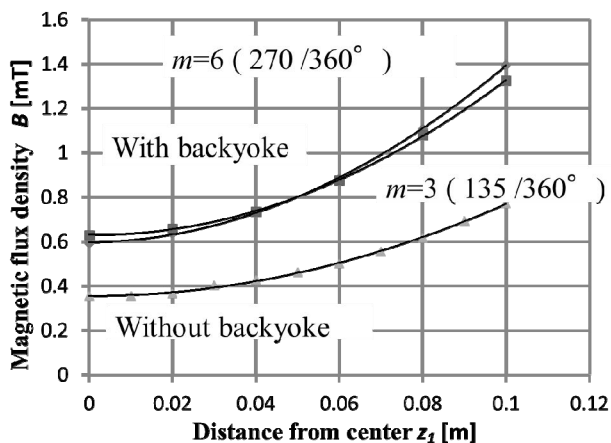


Fig. 8 Magnetic distribution above pancake coil.

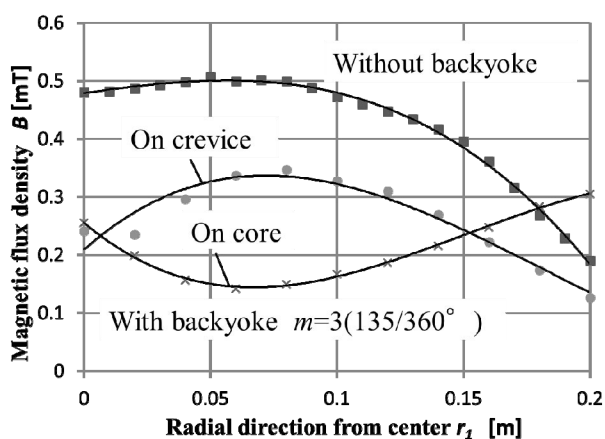


(a)  $m=6$  ( $270/360^\circ$ ). (b)  $m=3$  ( $135/360^\circ$ ).

Fig. 9 Exciting coil with back yoke in part. (Ferrite)



(a) Magnetic distribution above pancake coil with back yoke. (Ferrite)



(b) Magnetic distribution among pancake coils with back yoke. (Ferrite)

Fig.10 Magnetic field distribution above pancake coil.

Table 2. Comparison of magnetic flux density.

	Ferrite	Magnetic sheet
Enhancement rate of B at the center [%]	50	30~40
Decreasing rate of B outside back yoke [%]	70~75	60~70

### 3.2 等価回路パラメータと損失

磁界発生装置のパラメータを Fig. 11 の等価回路において検討した。 $L_1, L_2$  は励磁側・誘導側コイルのインダクタンス,  $C_1, C_2$  は励磁側・誘導側の共振用外付けコンデンサである。 $k$  は励磁側誘導側間の結合係数である。また、基本的に励磁電流が励磁側・誘導側コ

イルに流れるが、コイルの抵抗損失、コンデンサの誘電損失ならびにその他の浮遊損失を含めた励磁側・誘導側コイルにおける損失を等価直列抵抗  $Rs_1, Rs_2$  で表す。

Fig. 12 はフェライト磁心, Fig. 13 は磁気シートを使用した励磁・誘導側インダクタンスの測定結果である。Fig. 12 より磁心の枚数  $m = 6$  と励磁コイルを 7 割覆った状態で自己インダクタンスはフェライト磁心が無い状態から約 38 % の増加であった。また, Fig. 13 より磁気シートの厚みを変えていくとインダクタンスは約 20 % 程度の増加であった。自己インダクタンスはフェライト磁心, 磁気シートのいずれもコイル間距離とコイル径が同程度であるため、バックヨークが付加されても開磁路に近い磁気回路になるためだと考えられる。インダクタンスの増加はコイル電圧の増大、コンデンサの耐電圧などの回路特性に影響を及ぼすが、磁界増強効果を考慮すると前述の素子による電圧増加の影響は軽度である。

バックヨークが付加されることにより鉄損が加わることが見込まれたため、励磁コイルの  $Q$  値を測定し等価直列抵抗を求めた。Fig. 14 はフェライト磁心の付加枚数  $m$  を 0~6 に変化させたときの  $Q$  値および等価直列抵抗である。 $Q$  値は最大 10 % 増加し、等価直列抵抗は変化なく一定であった。等価直列抵抗はコイルの銅損、鉄損、コンデンサの誘電損失を含めた値であるが、等価直列抵抗の増加は少なく、損失はコイルの銅損が主なものと考えられる。一方, Fig. 15 は磁気シート厚みを 0~3.6mm に変化させたときの  $Q$  値および等価直列抵抗である、磁気シートを 1 枚(0.6 mm) 付加することにより  $Q$  値は減少し、等価直列抵抗は増加した。磁気シート厚みをさらに増やすことにより  $Q$  値は増加していき、等価直列抵抗は減少していった。この理由は磁気シートのヒステリシス損が大きいため、1 枚の場合磁束密度が大きくなり、厚みを増やすことで磁気シートの磁界が減少し、 $B^2$  に比例するヒステリシス損が体積の増加にかかわらず減少したため  $Q$  値は増加し等価直列抵抗が減少したと考えられる。また、磁気シートはフェライト磁心と比較し損失が高く、使用時にヒステリシス損による発熱が確認された。

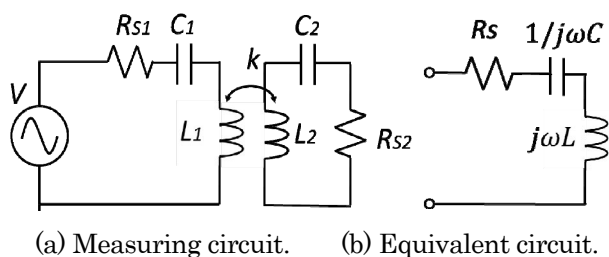


Fig. 11 Equivalent circuit of magnetic field generator.

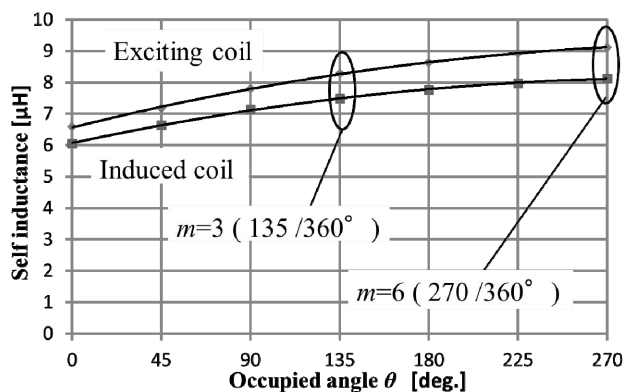


Fig. 12 Self-inductance for pancake coil with back yoke. (With ferrite core)

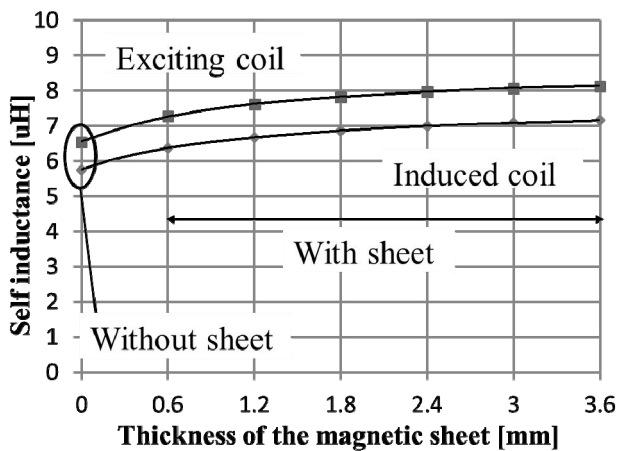


Fig. 13 Self-inductance for pancake coil with back yoke. (With magnetic sheet)

#### 4 結言

体深部での磁界増強を目指した 2 個の平面形励磁コイルからなる磁界発生装置において、磁気シートで構成したバックヨークを付加することでコイル間の磁界強度は 30~40 %増加し、上下コイルの外側に発生していた漏れ磁界は最大で 70 %減少した。磁気シートはフェライトと比較したところ、磁気特性は劣るものの加工性、軽さといった機能性の点で非常に優れており、医療機器からは軽量化・機能性は注目される。

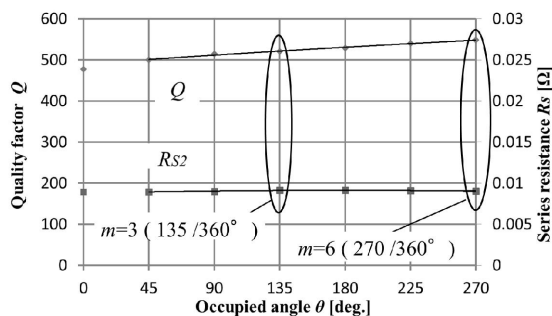


Fig. 14 Parameters of equivalent circuit for coil. (With ferrite)

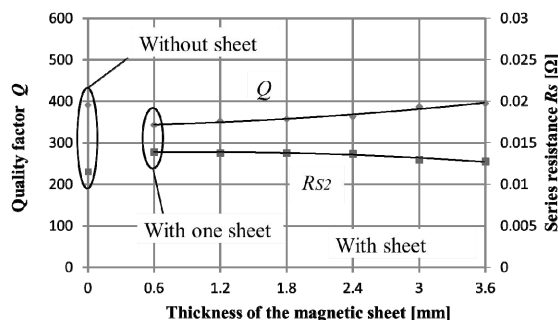


Fig. 15 Parameters of equivalent circuit for coil. (With magnetic sheet)

(2014 年 9 月 30 日受付, 2015 年 4 月 30 日再受付, 2015 年 9 月 10 日再々受付)

#### 参考文献

- [1] Y. Yamazaki I. Nagano, S. Yagitani, T. Maeda, K. Igarashi, K. Terai, H. Nagae, and K. Tazawa : Heating characteristics of dextran magnetite under a strong AC magnetic field created by a portable magnetic generator, *JSAEM Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, **Vol.14**, pp.241-247, 2003.
- [2] H. Nagae, S. Yamada, Y. Ikehata, S. Yagitani, and I. Nagano, Study on cancer treatment using magnetic fluid for medicine and induction heating device, *IEEJ Trans. on Fundamental and Materials*, **Vol.133**, No. 6, pp.366-371, 2013.
- [3] T. Maruyama, T. Takura, F. Sato, H. Matsuki, S. Aiba, and T. Sato, Examination of soft-heating hyperthermia exciting composition with a plane type spiral coil, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **Vol.31**, No.3, pp.380-386, 2007.
- [4] Investigating R&D committee of Seeds Technology to Medical Treatment in Magnetic Applications : The trend of magnetic applications in medical technology, *JIEE Technical report*, No.1260, 2012.
- [5] I. Sasada: Analysis of a mid-range energy transfer circuit based on an equivalent circuit model, *Digests of the 35 annual conference on magnetics in Japan*, 29aC-1, p.242, 2011.
- [6] S. Yamada, Y. Ikehata, T. Ueno, and M. Kakikawa , Fluctuation of resonance frequency of applicator having wireless power transmission for hyperthermia therapy, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **Vol.37**, pp.282-285, 2013.
- [7] S. Yamada, Y. Ikehata, T. Ueno, and M. Kakikawa, Control of exciting frequency to pancake type applicator having wireless transmission for hyperthermia therapy, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **Vol.38**, pp.37-41, 2014.
- [8] K. Kamei, M. Abe, and K. Kondo : Recent trends and uses of noise suppression sheets, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **Vol.8**, No.4, pp.206-210, 2013.
- [9] NEC/Tokin, BUSTERAIS, .Vol.17, 2014.