

誘導加熱による磁性木材の発熱特性について(1) Heating Characteristic of Magnetic-Wood using Induction Heating (1).

○瀬川康祐, 岡 英夫,
○Kohsuke Segawa, Hideo Oka,
岩手大学
Iwate University

高芝俊雄*
Toshio Takashiba*
岩手県林業技術センター*
Iwate Prefectural Forestry Technology Center.*

キーワード：磁性木材(Magnetic-Wood), 磁性流体(Magnetic fluid), 誘導加熱(induction heating),
交流磁化特性(AC magnetic characteristic)

連絡先：020 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部電気電子工学科 岡研究室 岡 英夫
Tel.&Fax.019-621-6389, E-mail:hoka@msv.cc.iwate-u.ac.jp

1. はじめに

磁性流体を注入することにより木材に磁気特性を付与した磁性木材^{[1][2]}は、木材固有の特徴である低比重・加工容易性などを有する、新しい複合材料である。このため、木製の床、壁、或いは家具などに、磁気的な機能を付与することが可能である。

先に筆者等は、磁性体が誘導加熱できる点に着目し、磁性木材を高周波磁界で励磁することにより発熱体として機能する、磁性木材の研究を行ってきた。

近年、家庭用などの暖房器において、高齢化に対応して安全性の向上が求められており、電気温水器と同様^[3]に夜間電力を利用した、電気方式の床暖房が普及してきている。この場合の加熱方式としては抵抗加熱が代表的である。しかし加熱する全体の体積に対して発熱部が小さいため、高温にならざるを得ない。

一方、同様に電気加熱方式のひとつである誘導加熱は、発熱材料を磁界によって内部から高速に加熱することが出来るという利点を有する^[4]。このため、所用の熱量を得る際に、熱密度が小さくてよく、比較的安全性の高い加熱装置が実現できるものと考えられる。さらに、磁性体のキュリー温度特性を利用することによって、任意の温度以上への過熱を抑制する「ソフトヒーティング」が提唱されており^[5]、磁性木材においてこの特性を応用できれば、温度制御機能も兼ね備えた高機能温熱材料が実現できると期待される。

しかしこれまでの研究に於いて、誘導加熱時に磁性木材が、どの程度の温度まで上昇するかについては、十分に明らかにされていない^[6]。また、交流磁気特性から磁心損失として得られるエネルギーは全て熱になるものと予想されるが、実際の発熱量との関連性についても、これまでに明らかにされ

ていない。

一方、木材に注入している磁性流体自体は超常磁性体であるが、これが溶媒を失った状態で、高周波磁界によりどの程度の発熱量が得られるのかについては、十分なデータが得られていない。

そこで本研究では、まず、溶媒を蒸発させた磁性流体のゲルおよび磁性木材のそれぞれについて、これを高周波励磁した際の温度変化から発熱量を算出し、磁心損失との関係を明らかにした。

次に、実際に温熱材料として用いることができるような、励磁線を挿入した合板の磁性木材の試作を行った。その入力電力と温度変化量との関係について明らかにし、市販されている床暖房装置の性能^[6]である出力 250W/m²と比較して、温熱材料としての磁性木材の有効性を示した。また磁性木材の磁気特性から試作した合板の発熱量を予測し、実測した発熱量と比較して、その算出方法の評価を行った。

2. 磁心損失と初期温度変化率

物体に熱入力を加えた場合、その初期温度変化率 $d\theta/dt$ は熱入力に比例し、物体内に発生した熱量 Q [J]、物体の比熱 c [cal/g.K] および質量 m [g] に次式の関係が成り立つ^[7]。

$$Q = 4.186 \times cm \left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{t=0} \quad \dots (1)$$

ただし、 θ は温度変化量である。従って、 $d\theta/dt$ の値として毎秒あたりの温度変化量を

代入すれば、 Q は毎秒あたりの発熱量として求められる。従って、励磁開始からの温度変化、比熱および質量がわかれば、内部に発生した熱量 Q を知ることができる。

一方で、磁心損失 P_c は磁心において消費された全電力であるから、 P_c と Q の関係を知ることによって、磁気特性から発熱量を計算することができると考えられる。

比重が 0.23~1.10 の間の木材において、ある温度範囲 $\theta_1 \sim \theta_2$ 間の平均比熱は次式で表される^[8]。

$$c_w = 0.266 + 0.00058(\theta_1 + \theta_2) \quad \dots (2)$$

スギの平均的な比重は 0.38 であり、温度を加熱の目標温度である 20~30°C とすれば、比熱 c_w は次式のように求められる。

$$\begin{aligned} c_w &= 0.266 + 0.00058 \times (20 + 30) \\ &= 0.29 \text{ [cal/g.K]} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

磁性木材の比熱に関しては実測により求めるのが望ましいが、本研究では実測によらずに次のようにして求めた。

本研究で用いた試料は、未処理木材に関しては、木材（空隙を含む）及び励磁線、磁性木材に関しては、木材、注入された磁性体（マグネタイト Fe_3O_4 ）および励磁線のそれぞれから成ると考えることができる。そこで、木材、磁性体および励磁線の比熱を c_w 、 c_m 、 c_e 。試料におけるそれぞれの重量を W_1 、 W_2 、 W_3 とすれば、磁性木材の平均的な比熱 c_{wv} は次式で表せると考えられる。

$$c_{MW} = \frac{c_W \times W_1 + c_M \times W_2 + c_e \times W_3}{W_1 + W_2 + W_3} \quad \dots (4)$$

c_w としては、式(3)から求めた値を用いる。磁性体(マグネタイト)に関しては文献が得られなかったため、鉄の比熱^[9]を用い $c_M=0.11$ [cal/g.K]とする。また c_e は銅の比熱^[9]から 0.0919 [cal/g.K]とする。以上から、磁性木材の比熱 c_{MW} は次式によって求められる。

$$c_{MW} = \frac{0.29 \times W_1 + 0.11 \times W_2 + 0.0919 \times W_3}{W_1 + W_2 + W_3} \quad \dots (5)$$

3. 測定試料

3.1 磁性流体試料および磁性木材の環状試料

まず、ゲル化した磁性流体（以下磁性流体ゲルと称する）の磁気特性および発熱特性を測定するために、これらの環状試料を作製した。磁性流体は液体であるために、環状の容器内に封入し、その上から巻線を施して作製した。

一方、木材試料としては、筆者等のこれまでの研究^{[10][11]}において、含浸による重量増加率が最も高いスギ(*Cryptomeria japonica*

D. DON.)の心材を供試材として選定した。磁性流体には水ベース磁性流体 W-35 を用い、注入は筆者等のこれまでの研究^[2]と同様に、減圧-710mmHg 2時間、加圧 7kgf/cm² 2時間にて行った。この磁性木材の重量増加率は 162%であった。

また、磁性流体を注入しない未処理材を用いた環状試料も作製し、未処理材における発熱量から、励磁巻線の発熱量を求めた。

表1は、これら磁性流体および磁性木材双方の、試料寸法である。いずれの試料にも、交流磁気特性の測定を行うために1次2次とも20ターンの巻線を施した。

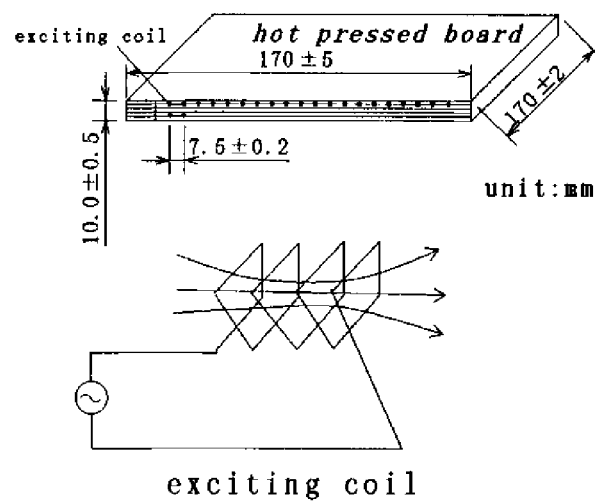


図1 試作した合板の概略図

表1 環状試料の寸法

	寸法			重量 [g]			
	平均磁路長 [mm]	磁路断面積 [mm ²]	空隙を除いた断面積 [mm ²]	全重	磁性体	巻線	木材
磁性木材	57.02	52.02	-	4.00	1.75	1.17	1.08
未処理木材	56.86	52.53	-	2.08	0.00	1.18	0.90
磁性流体ゲル	48.54	61.04	31.68	6.20	2.98	1.17	0.00

3.2 磁性木材の合板の作製

図1は、試作した磁性木材の合板の概略図である。供試材には、環状試料と同様にスギを用いた。柎目方向にパネルソーで切断した板に磁性流体を注入し、これを5プライ重ねたうえで、間に励磁線を挟んで合板を作製した。なお発熱量を比較するために、磁性流体を注入しない未処理材を用いた合板も作製した。

励磁線は、図示の通り0.5φのエナメル線

を4mm幅で組み、これを7.5mmピッチで配置したものである。従って、コイルの形状は、ピッチが7.5mmの扁平なソレノイドコイルと同等である。

なおバインダには、酢酸ビニルエマルジョンでは加工に十分な接着強度が得られなかった^[11]ことから、本実験ではレゾルシノール樹脂^[12]を用い、これを50°C、10kgf/cm²で24時間圧縮した。

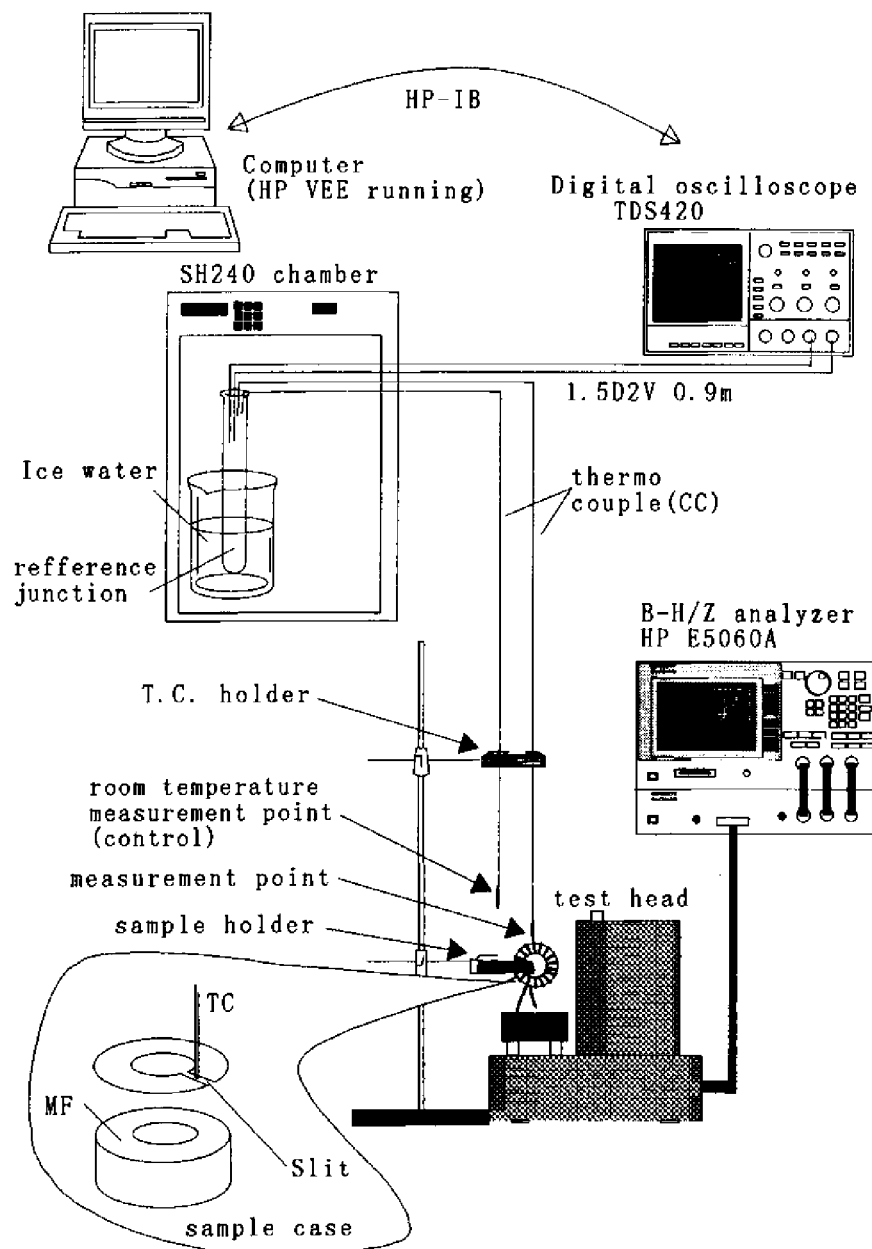


図2 環状試料の発熱特性測定装置

4. 測定方法

4.1 磁心損失および熱電対による表面温度測定

図2に磁心損失 P_c および表面温度変化量の測定装置を示す。計器にはB-H/Zアナライザ HP E5060A を用いた。表面温度の測定には銅-コンスタンタン熱電対を用い、励磁開始から15分間の試料の表面温度変化を測定した。なお測温部は、熱的接触を良好にする^[13] ために、樹脂製のクリップで挟んだ。また磁心損失 P_c は、励磁開始直後および励磁を終了する1分前に、励磁したままの状態でも測定した。

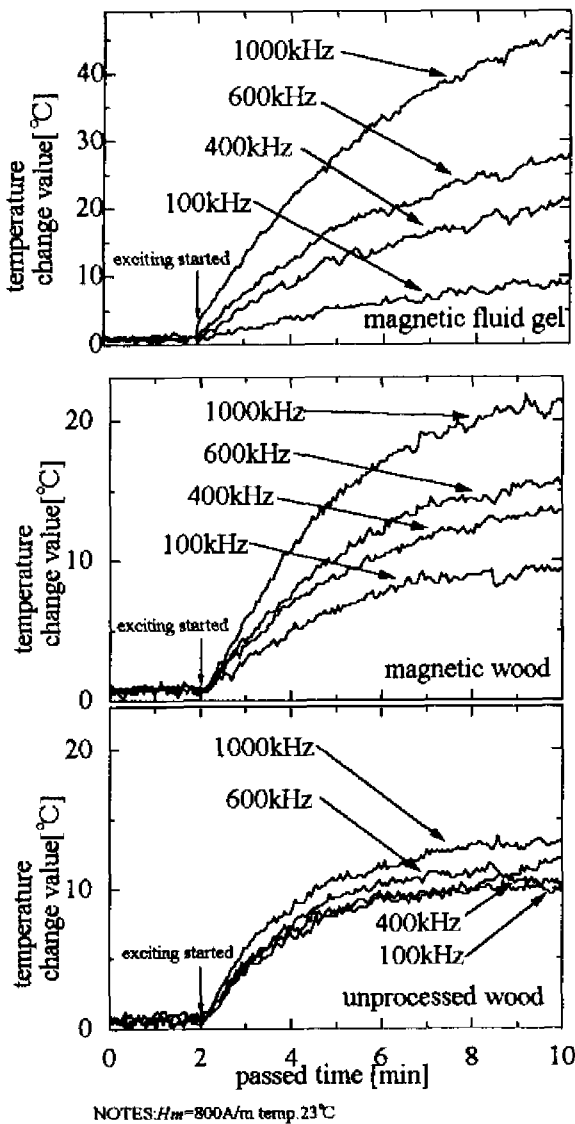


図3 環状試料の発熱特性

4.2 赤外線熱画像装置による表面温度測定方法

試作した合板を周波数 1MHz, 電流 2A で励磁し、この際の発熱特性を、アビオニクス社製赤外線熱画像装置 TVS2200ST を用いて測定した。初期温度変化率は、合板表面上の5点の温度変化の平均値から求めた。また、励磁中の負荷端電圧及び励磁電流をデジタルオシロスコープ TDS420 にて測定し、それぞれの最大値と位相角から実効電力を算出して、発熱量と比較した。

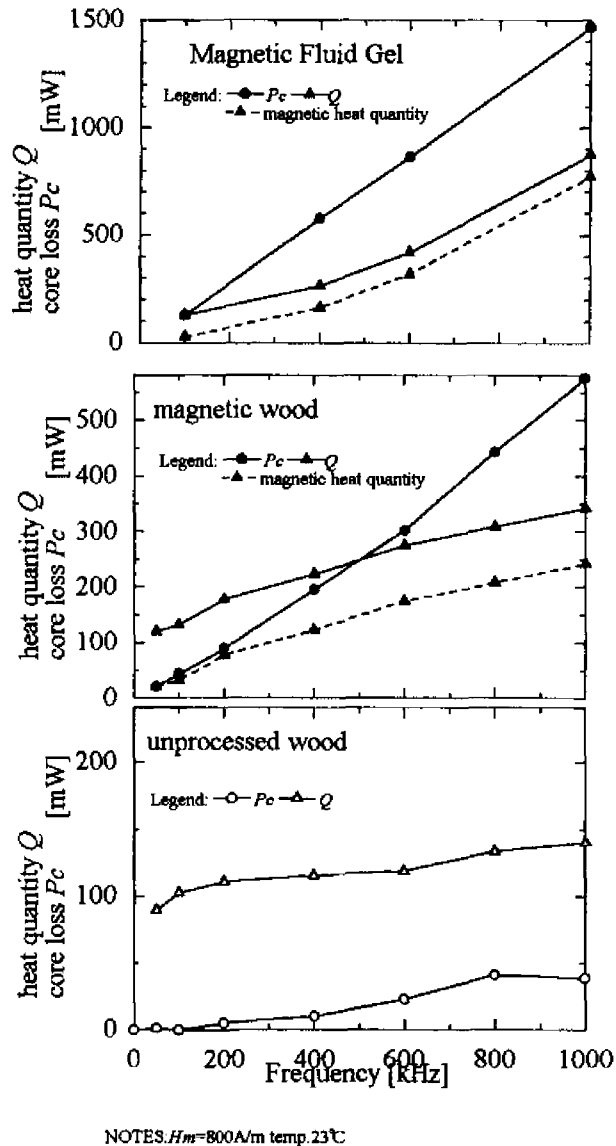


図4 環状試料の発熱量と磁心損失の関係

5. 実験結果及び検討

5.1 発熱量の測定結果

図3に、磁性流体ゲル、磁性木材および未処理材環状試料を、 $I/m=800A/m$ で励磁した際の温度変化を示す。図示の通り未処理材においても $10^{\circ}C$ ほどの温度変化が認められた。しかし磁性木材及び磁性流体ゲルと比較して周波数への依存性が小さいことがわかる。従って、これは励磁線自体の発熱によるものと予想される。

一方、磁性木材および磁性流体ゲルは、周波数が高くなるにつれてその温度変化量も大きくなることから、磁気的な損失による発熱が支配的であるものと考えられる。またその値も、1MHzにおいて、磁性流体ゲルで $40^{\circ}C$ 、磁性木材で $20^{\circ}C$ 程度が得られた。

図4に、磁心損失 $P_c[W]$ および図3の温度変化率と式(1)により求めた、それぞれの試料における発熱量 $Q[W]$ の周波数特性を示す。同図に示すとおり、未処理材においては、磁心損失と発熱量の実測値との間に、周波数に関係なく約 $100[mW]$ 程度の差が生じた。これが励磁線による発熱量であると考えられる。そこで同図の破線に示したように、この $100[mW]$ を磁性流体ゲルおよび磁性木材において測定された Q から差し引くことにより、磁気的な損失のみによる発熱量を求めた。この結果、 $200kHz$ 以下では発熱量 Q および磁心損失 P_c の値がほぼ一致し、磁心損失のほとんどが熱として放射されていることが明らかにされた。しかし $200kHz$ 以上では、磁性木材および磁性流体のいずれの場合においても発熱量 Q は磁心損失 P_c と一致していない。

これらの差は、本実験では試料の表面温度からその発熱量を求めているため、試料内での熱伝導により生じた損失であると予想される。

一方、発熱量が大きくなるにつれて放熱量が大きくなったことにより生じる、初期温度変化率の値の誤差、また磁性流体ゲルの測定結果においては、測定試料容器の比熱について文献が得られなかったため、これを $0.3 [cal/g \cdot K]$ と仮定して計算しており、この値に起因する誤差も含まれると考えられる。従って、これらも含めた上での検討が今後必要である。

5.2 試作した合板の発熱特性

図5に、試作した磁性木材及び未処理の合板を、1MHz, 2Aにて誘導加熱した際の表面温

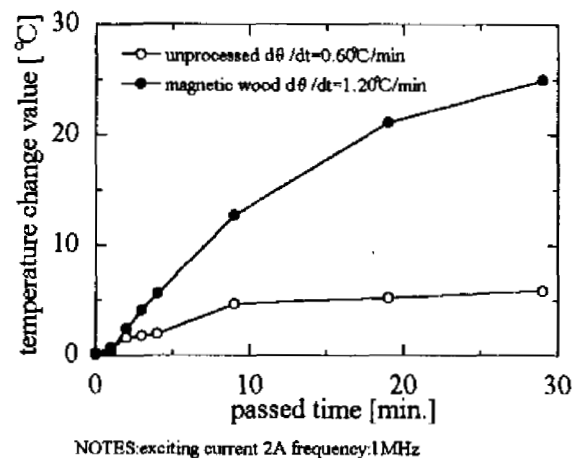


図5 試作した合板を1MHzで励磁した際の表面温度変化

表2 磁性木材の合板の発熱量と入力電力

	$d\theta/dt$ [$^{\circ}C/s$]	発熱量 Q [W]	実効電力 [W]
未処理材	0.0099	1.9	12
磁性木材	0.020	4.8	19

度変化を示す。図示の通り、磁性木材では、未処理材に比べて 20℃以上の温度変化量が得られた。表 2 は、同図から求めた初期温度変化率および励磁中の実効電力を比較したものである。未処理材により作製した合板においても、1.9[W]程度の発熱量があり、これが試作した合板における励磁線自体の発熱量と考えられる。従って、磁性木材の合板における磁気的な損失による発熱量は、この分を差し引いた 2.9[W]程度であるといえる。この結果、入力した電力と、実際に発熱量として測定された値との間には 4 倍の差があることが認められた。

ここで電気床暖房装置の単位面積当たりの発熱量として、200~250W/m²という値と比較を行った。今回作製した合板の面積は 0.0272m²である。表 2 から磁性木材合板の発熱量は 4.8[W]であるから、単位面積当たりの発熱量は次式の通りとなった。

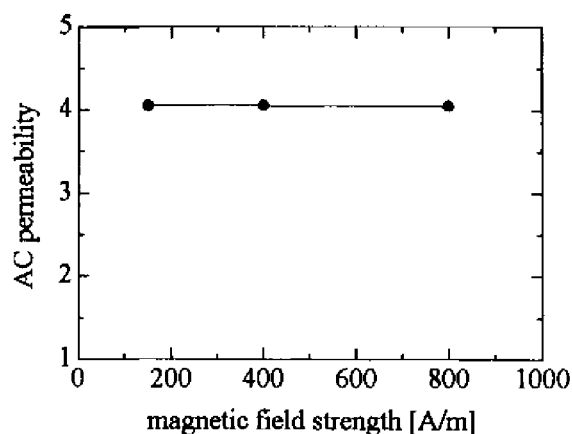
$$4.8/0.0272=176.5[W]$$

従って、今回作製した磁性木材においては、概ね実用上必要な発熱量を得ることができたといえる。しかし、より低い周波数、電流での励磁および励磁コイルを少なくするためには、今後磁性木材の特性改善が必要である。

5.3 磁性木材合板における磁気的損失の推定

ここで、磁性木材環状試料の磁心損失測定結果から試作した磁性木材の合板の発熱量を算出し、実測値との比較を行った。

$f=1\text{MHz}$, $H_m=800\text{A/m}$ の励磁条件における磁性木材の単位体積磁心損失 P_{cv} は、磁性木材の環状試料の測定結果から 194[kW/m³]であった。



NOTE: temp. 20℃ measured HP B5060A
sample: magnetic fluid gel

図 6 磁性流体ゲルの透磁率の磁界強度依存性

磁性流体の透磁率の磁界強度に対する変化は、図 6 に示したように 150~800A/m の範囲において誤差範囲内であった。従ってこの P_{cv} は励磁磁界 H_m の二乗に比例するとしてよいから、磁性木材の合板内の、磁界強度の二乗平均値から、磁性木材の合板全体の損失を算出できる。

ここで今回試作した合板の体積 V は 272cm³ であり、以上から、この磁性木材合板における磁気的な損失による発熱量を次式のように算出した。

$$\begin{aligned}
 P &= P_{cv} \times \left(\frac{\bar{H}}{H_m} \right)^2 \times V \\
 &= 194 \times 10^3 \times \left(\frac{73200}{640000} \right)^2 \times 272 \times 10^{-6} \\
 &= 6.0[W]
 \end{aligned}$$

... (6)

ただし \bar{H} は、合板内の磁界の二乗平均
 P_{cv} は $H_m=800\text{A/m}$ における磁心損失の実測値

この値は、前節で得られた発熱量である 2.9[W] の約 2 倍である。すなわちこの場合も、図 4 と同様に発熱量が磁心損失の約 1/2 という結果となった。

6. まとめ

本研究では、磁性木材およびその磁性の要因たるゲル化した磁性流体を誘導加熱した際における発熱量と、磁気特性である磁心損失との相関性について明らかにした。以下に結果を述べる。

- ① 誘導加熱時における内部の発熱量 Q は、ゲル化磁性流体及び磁性木材のいずれにおいても、200kHz 以下ではほぼ同じ値を示し、磁心損失のほとんどが熱として放射されることが明らかにされた。しかし 200kHz 以上においては、その発熱量は最低で磁心損失の 1/2 程度となり、熱伝導などによる損失があるものと予想された。
- ② 試作した磁性木材の合板において、 $f=1\text{MHz}$, $I=2\text{A}$ の励磁条件における温度変化から求めた発熱量は 4.8[W] となり、実用的にほぼ十分な発熱量を得ることが出来た。また、磁気的な損失のみによる発熱量は約 2.9[W] となり、今回作製した磁性木材の合板においては、その 60% が磁気的な損失によることが明らかにされた。
- ③ 環状試料における磁心損失の測定結果と励磁磁界から、試作した磁性木材の合板の、磁気的な損失量の算出を行った結果、実測された発熱量の約 2 倍である 6[W] と求められた。これは環状試料における発熱量と磁心損失の関係と近いことから、磁性木材を誘導加熱する際のおおよその発熱量を求める方法を示すことができたといえる。

しかし、本研究においては比熱に実測値を用いておらず、また熱伝導による損失も考慮

していない。従って今後、以上を含めて磁心損失と発熱量のより定量的な関連づけを行い、そのうえで磁性木材の高性能化を検討する。

謝辞

日頃、木材に関して御指導を賜り、本研究を行うにあたり供試材の単板を提供していただきました本学農学部応用生物学科 木材利用科学講座助教授 関野登先生に、深く感謝申し上げます。また、試料の加工をしていただきました本学工学部電気電子工学科技術官 徳田春男氏、ならびに貴重なご教示を頂いた岩手県林業技術センター谷内博規氏に深謝申し上げます。

最後に、有益なご助言をいただいている磁性木材開発協同組合の皆様には感謝いたします。

なお、この研究の一部は笹川科学研究助成および文部省科学研究費萌芽的研究による。

参考文献

- [1] 岡：「磁気特性を有する木質材」特願平 4-93131, (1992)
- [2] H. Oka: "Basic study of Magnetic Wood and its Application" International Workshop on Wood and Magneto-electronics Morioka, Japan, pp. 13-18, (1996)
- [3] 池本・吉田：「家庭機械・電気・電子」pp. 88-89, 理工学社, (1996)
- [4] 中村：「高周波加熱」pp. 11-12, 恒星社厚生閣, (1989)
- [5] 松木「感温磁性材料とソフトヒーティング」, 昭和 61 年 電気学会全国大会 S. 6-7, (1986)
- [6] 北日本電線㈱「サンスーシ」パンフレット
- [7] 佐藤・他「全自動高周波鉄損計測システム」電子情報通信学会論文誌 Vol. J76-C-II No. 6 pp. 476-483 (1993)
- [8] 農水省林業試験場監修：「木材工業ハンドブック 改訂 3 版」, P. 111, (1982)
- [9] 玉虫ほか 7 名編「理化学事典 第 3 版」岩波書店, p. 875, (1971)
- [10] 伊藤・岡：「加圧法により作製した磁性木材

の透磁率に関する実験的検討(1)」電気学会
マグネティックス研資 MAG-93-145, pp. 121-
128, (1993)

[11] 瀬川・岡: 「磁性木質材の作製とその温熱機能
に関する実験的検討」計測自動制御学会東北

支部研資 160-4, (1996)

[12] 徳田・鈴木: 「木質資源材料」木材科学講座
8, p. 120, 海青社(1993)

[13] JIS Z8704(1993)温度測定方法通則