

セラミックス製発熱体の開発 - 各種発熱体の誘導加熱特性 -

伊藤 隆* , 稲垣順一** , 林 茂雄** , 岡本康男*

Development of the Heating Element Made from Ceramics - Induction-heating Characteristic of the Various Heating Elements-

by Takashi ITO, Jun-ichi INAGAKI, Shigeo HAYASHI and Yasuo OKAMOTO

The heating characteristic by induction heating of various heating elements was investigated. Induction heating was performed, where samples placed on the ceramic pieces with small predetermined thickness (0, 2, 4, and 8mm) on the induction heating cooker. Although it is thought that power consumption tends to generate heat greatly so that the distance of an induction heating and a heating element is small, the temperature of the induction heating cooker itself goes up too much, a thermal failsafe system operates, and heating may be controlled. The Zirconium Boride-Beta Spodumene system material had a positive temperature coefficient like metals and a temperature rise earlier than an iron, and the temperature coefficient is an iron abbreviation half. Even if it compared the temperature coefficient of carbon 2 with the carbon 1 (carbon sintering material) generally said to be low, it was remarkably low, and the temperature dependability is a very small.

Key words: Induction heating, ZrB_2 , Carbon, -Spodumene

1. はじめに

電磁調理器 (IH クッキングヒータ) は, 家庭用加熱調理機器として急速に普及し始めている. 電磁調理器による加熱は誘導加熱によるものであり, 電磁調理器の内部に設けられたコイルに 20 ~ 50 kHz の高周波電流を流すと, 発生した磁界によって, 電磁調理器の上に置かれた鉄鍋などの導電体に渦電流が流れる. このとき, 導電体の電気抵抗によるジュール損により, 発熱する.

土鍋は, それ自身の電気抵抗が非常に大きく, 電磁調理器に掛けてもそのままでは発熱しない. そこで, 渦電流が流れるための導体として, 銀, アルミニウムの薄膜を取り付けた土鍋が市販されている. しかし, 銀やアルミニウムの薄膜は, 電

磁誘導の式により, 電磁調理器で利用される周波数帯域では, 導体に流れる電流の浸透深さが一意的に規定され, 膜厚の制御が難しいだけでなく, 発熱効率に著しい影響を及ぼす. さらに, 近年, 200V 仕様電磁調理器が普及し, これを使用した場合, 金属薄膜に流れる電流が大きくなり, 過電流による膜自体の破断・焼損等の欠陥の発生する可能性がより高くなっている.

このような状況の中で, 金属薄膜と土鍋の接合による問題および薄膜自体の耐電流性を解決する方法として, 電磁調理器で加熱できる (誘導加熱が可能) セラミックス製発熱体を開発し, 土鍋への応用を試みているところであるが, 誘導加熱を行った場合の発熱体の温度変化, 温度分布などの加熱特性については不明な部分が多い. そこで, 各種発熱体の誘導加熱による加熱特性を調べたので報告する.

* 窯業研究室応用技術グループ

** 窯業研究室材料開発グループ

2. 実験方法

誘導加熱用の発熱体として、表1に示すようにホウ化ジルコニウム-βスポジユメン系焼結体、カーボン系焼結体（2種類）及び鉄を用いた。これら発熱体は、誘導加熱に適するように直径約160mm、厚さ3～5mmとした。誘導加熱を行うための電磁調理器は100V、1.4kWタイプのものを使用した。

表1 誘導加熱用発熱体の種類

名称	組成等
Z-LAS	ホウ化ジルコニウム-βスポジユメン系焼結体
カーボン1	カーボン焼結体（市販品）
カーボン2	カーボン系材料焼結体（試作品）
鉄	一般構造用圧延鋼材（SS400）

各発熱体の誘導加熱による加熱特性を調べるため、電磁調理器上に所定の厚さの小さなセラミック片を置き、その上に発熱体を乗せて電磁調理器と発熱体との距離を2、4及び8mmにした状態で誘導加熱を行った。また、実際に加熱調理を行う場合と同様の状態である電磁調理器に直接発熱体を乗せた状態（0mmで表す）でも加熱を行った。

発熱体表面の温度を熱画像測定装置と熱電対で測定した。熱電対は、最も温度が高くなると考えられる発熱体の縁から中心に向かって約2cmの場所に設置した。また、誘導加熱に伴う消費電力を消費電力測定装置で測定した。消費電力測定装置は、入力側の電圧、クランプメータによる電流測定および接触型熱電対（JIS-Rタイプ）による発熱体の表面温度を時間軸で記録することが可能である。また、電磁調理器に供給する電圧は商用100Vであり、一般家庭と同様のレギュレーションである。

誘導加熱は、トランスの1次側-2次側と同様、コイル上に設置する2次側相当の導体は、図1に示すようなLR等価回路で表現することができる。そのため、導体面積の減少やコイルからの距離の増加に対して、インダクタンス成分が増加し、2次関数的に効率が低下するため、電磁調理器のインバータ発振回路（通常はIGBTによる点弧）

の無効電流が増加することによる効率の低下を来す。（この制御は、電磁調理器メーカ各社により若干仕様が異なる）。そこで、メーカ間の制御仕様の影響を含めた評価方法として、発熱体自身の温度上昇および、電磁調理器入力側の電流-電圧測定を実施した。

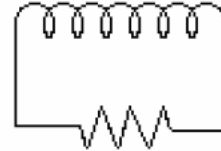


図1 発熱体の等価回路

さらに、Z-LASおよびカーボン2では、抵抗率の温度依存性も測定し、温度係数を求めた。（カーボン1および鉄は素材メーカ提供値）

3. 結果と考察

各発熱体の温度変化と消費電力の変化を図2、3、4及び5に示す。電磁調理器と発熱体の距離を2または4mmにしたものの方が0mmに比べて発熱体の温度が高くなる傾向を示したが、消費電力（電流・電圧の積を消費電力測定装置が自動演算）は、加熱開始から70～120秒後までは0mmが最も大きく、電磁調理器と発熱体の距離が増加するに従い、低下する。これから、電磁調理器と発熱体の距離が大きくなるに従い、発熱効

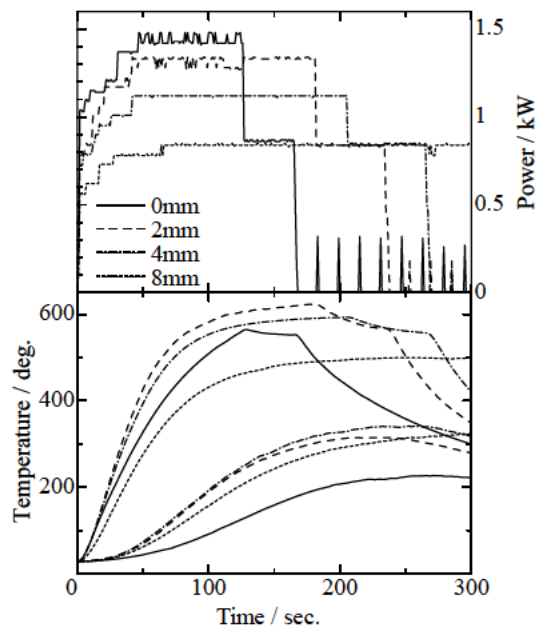


図2 Z-LASの温度変化および消費電力変化

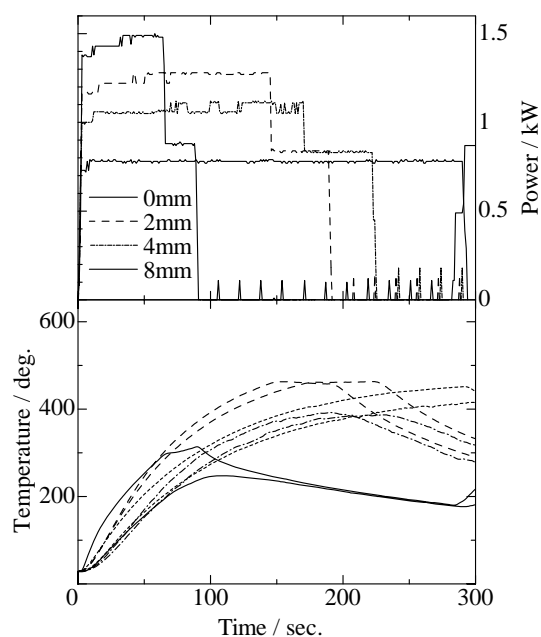


図3 カーボン1の温度変化および消費電力変化

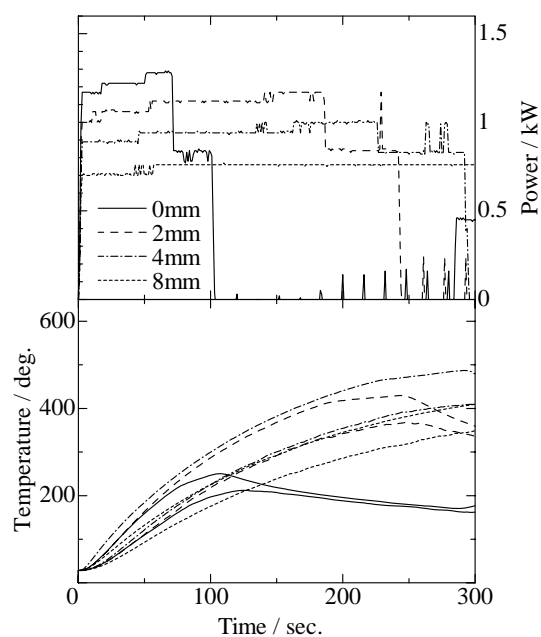


図4 カーボン2の温度変化および消費電力変化

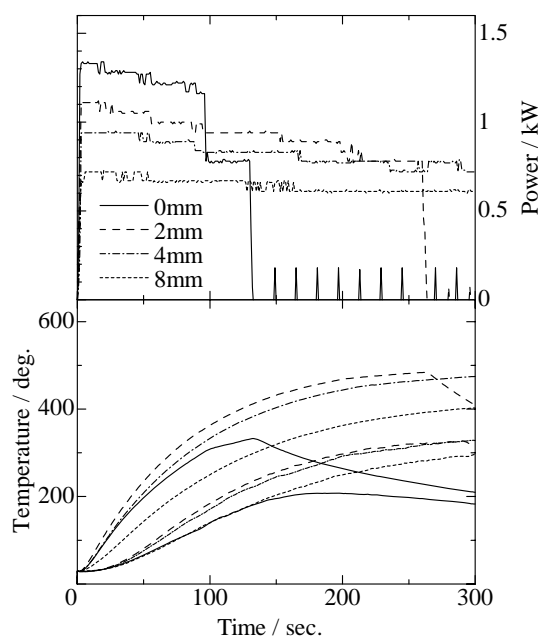


図5 鉄の温度変化および消費電力変化

率が低下する。0mmの場合は、2～8mmに比べて発熱体自体の発熱は大きいですが、電磁調理器に接触しているため、電磁調理器への伝熱によって発熱体表面の温度上昇が少なくなったものと考えられる。

加熱開始から70秒以上経過し、発熱体の温度が上昇してくると急激に消費電力が低下する現象を示すものがある。この現象は、発熱体の温度が

高くなり、熱伝導（0mmの場合）及び輻射によるトッププレートの温度上昇や、発熱体の温度係数により実効抵抗が変化することによるインバータ回路の無効電流増加に起因すると考えられ、トッププレート直下に内蔵された過昇温防止サーミスタ（設定温度：250）およびIGBTパワーランジスタの過昇温防止制御回路等のフェイルセーフ制御が作動したことによる。

発熱体の種類で比較すると、温度上昇の早い順は、Z-LAS、カーボン1、鉄、カーボン2であり、Z-LASは、発熱体との距離2mmで100秒後には約600に到達している。各発熱体の電気抵抗を表2に示す。温度上昇に伴い、Z-LASの電気抵抗は高くなるが、カーボン2の電気抵抗は低くなる。このことが消費電力の変化に対応していると考えられ、電磁調理器の温度制御装置が作動していない状態で、Z-LASの消費電力は温度上昇に伴わずかに低くなるが、カーボン2の消費電力は逆にわずかに高くなる。しかし、この消費電力の変化は極端に大きいものではなく、誘導加熱用の発熱体として通常用いられている鉄と比較しても大差はないことから、発熱体の機能としての問題はないと思われる。これは、表2に示すように、カーボン1および2の温度係数が著しく低いこと、Z-LASの温度係数が金属の温度係数に比べて1/2～1/3であるため

である。

次に、電磁調理器と発熱体の距離を2mm、加熱開始1分後、2分後及び4分後の各発熱体の熱画像測定装置による温度分布測定結果を図6に示す。これから、電磁調理器のコイルにあたる部分が発熱してリング状に温度が高くなり、加熱されない発熱体の中心部とはかなり温度差があることがわかる。特に、Z-LASは他に比べてこの傾向が顕著である。これは、Z-LASの熱伝導が、 $6.4\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ で(土鍋： $0.7\sim 0.94\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、鉄： $804\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、カーボン1： $92.8\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)、鉄や、カーボンに比べ低いためであり、トッププレート直下のサーミスタによる過昇温検知では有利に働く可能性も示唆された。

実験に用いた直径16cmの発熱体では縁から中心に向かって約2cm(中心から約6cm)の部分が最も温度が高く、中心部分が最も温度が低い。この温度差をTとすると、加熱開始2分後のTは、Z-LASは約500、カーボン1は約400、カーボン2は約280、鉄は約330であり、土鍋に装着するうえでこの温度差および温度上昇に伴う熱膨張に耐えられるような設計をすることが求められる。

また、リング状の発熱部分は必ずしも均一に温度が上昇する訳ではなく、温度上昇が早い部分と遅い部分がある。これは、各発熱体で同様に観察されることから、発熱体固有の性質によるものではなく、用いた電磁調理器の性能によるものと考えられる。原因の1つには、コイルの下に設置される漏洩磁束吸収用フェライトによる磁界の不均一等、種々の要素が考えられるが、この点は、さ

らに調べる必要がある。

4. まとめ

各種発熱体の誘導加熱特性を調べた結果、次のことが明らかになった。

(1)電磁調理器と発熱体との距離が小さいほど消費電力が大きく発熱しやすいと考えられるが、電磁調理器自体の温度が上がりすぎて温度制御装置が作動し、加熱が抑制される場合がある。

(2)ハウ化ジルコニウム-スποジューメン系焼結体は、カーボン、鉄よりも温度上昇が早く、金属と同様、正の温度係数を持ち、鉄の約半分であることがわかった。

また、カーボン2の温度係数は、一般に低いといわれるカーボン1(カーボン焼結体)に比べても著しく低く、温度依存性が極めて小さい材料であることがわかった。

(3)熱画像測定装置を用いて、各種発熱体における加熱に伴う温度分布の変化を明確に観察することができた。このデータから、発熱体を土鍋へ装着する場合に求められる耐熱温度差が推定できた。

謝辞

本研究は、平成13年度日本自転車振興会の補助金を受けて実施された。



表2 各種発熱体の電気抵抗と温度依存性

名 称	電気抵抗率 (10^{-4} cm)					温度係数 % \cdot $^{-1}$ (300)
	20	100	200	300	400	
Z-LAS	2.26	2.74	3.40	4.10	NA	+ 0.29
カーボン1	14.0	11.8	9.51	8.06	7.00	- 0.20
カーボン2	22.0	20.5	19.6	18.9	18.2	- 0.05
鉄	0.16	0.22	0.29	0.39	0.49	+ 0.51

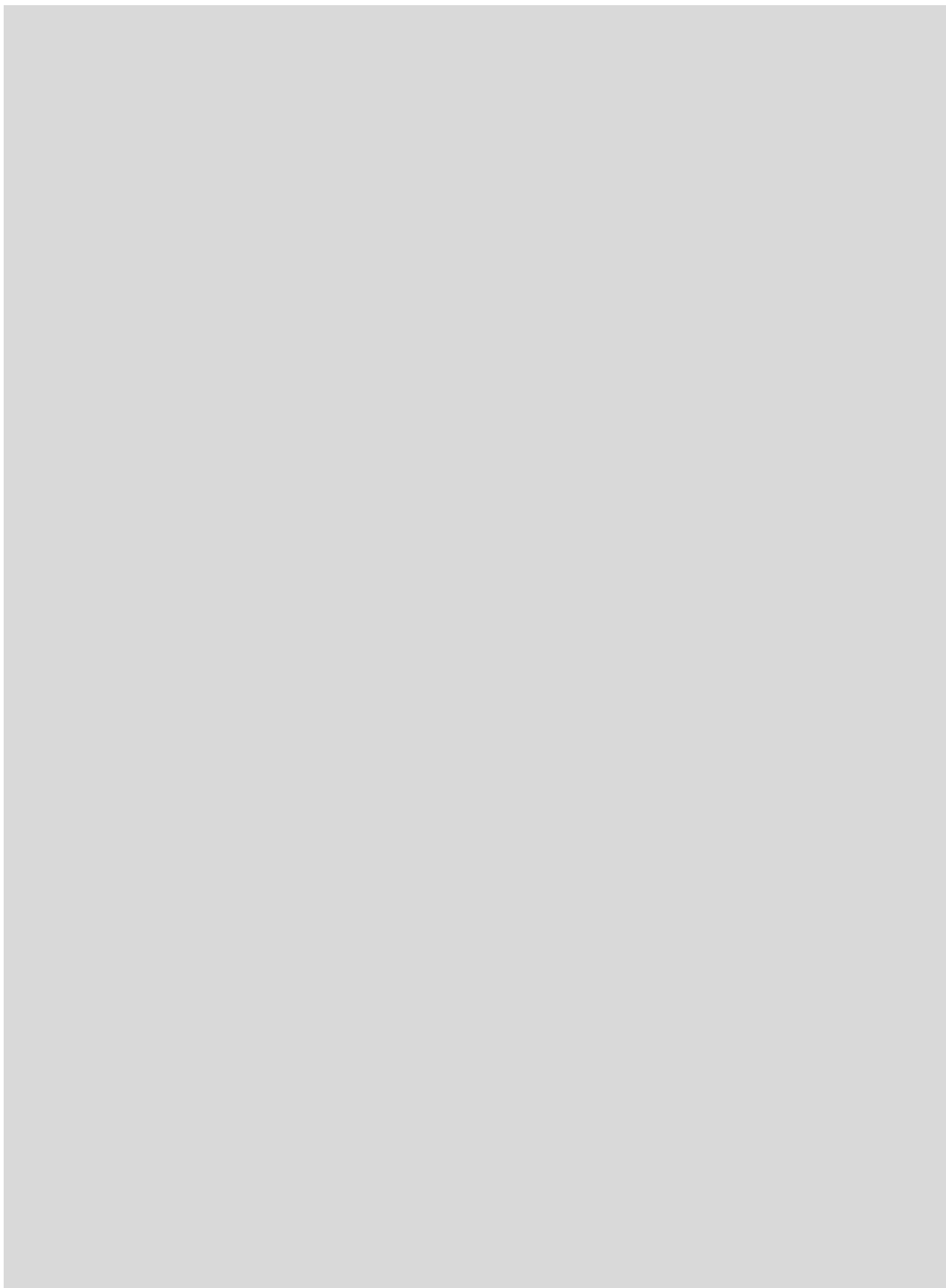


図6 熱画像測定装置による温度分布測定結果
(各画像中の十字線に沿った温度分布を各画像の左と下にそれぞれ示す。)

