

学術論文

FEM 解析による分割コイル方式 IH クッキングヒータの
漏れ磁束低減効果の検証Validation of Reduction of Leakage Magnetic Flux
in a Divided Heating Coil of Induction Heating Cooker by FEM Simulation奥山 耕平^{*1}, 荒井 純一^{*1} (正員), 米盛 弘信^{*2} (正員)

Kouhei OKUYAMA, Junichi ARAI (Mem.), Hironobu YONEMORI (Mem.)

Utilization of induction heating (IH) cooker is spreading as a normal utensil because it has high efficiency electrically and is easy to treat. Researches to make efficiency higher are continued for the IH cooker. One factor of losses is a leakage flux on the plate of the IH cooker. We had proposed a new coil configuration which has divided coil instead of conventional one coil. And it was reported that higher efficiency was obtained by energizing the inside coil for small pan and the both coils for large pan. In this paper, Finite Element Method (FEM) simulation is performed to clarify detailed leakage magnetic flux distribution of the divided heating coil. The simulation results are compared with experimental one for conditions of small pan heating and large pan heating, good correspondence between them is obtained. This FEM simulation will be useful for study to get higher efficiency in IH cooker.

Keywords: divided heating coil, induction heating, leakage magnetic flux, FEM simulation, IH cooker.

1 緒言

近年, 低炭素社会の実現に向けた取り組みとして, スマートグリッドに注目が集まっている。スマートグリッドでは, 需要側の取り組みとして電力を有効利用することが必要である。このような流れの中で, 高効率加熱が実現できる IH(Induction Heating)技術への関心が高まっている[1]。本研究では, 多数にわたる IH 技術の応用分野の中から IH クッキングヒータを取り上げる。IH クッキングヒータは, 加熱コイルから発生する磁束を鍋に鎖交させ, 磁束の変化により鍋底に渦電流を誘導し, 鍋自身を加熱する調理器である。そのため, 加熱効率は約 90 %でありガス調理器に比べて高効率である[2]。さらに, ガス調理器と異なり鍋からの吹きこぼれによる火の立ち消えやガス漏れの心配がない。以上のことより, IH クッキングヒータは安全性に優れた調理器と認知されて普及している。その一方で, 技術課題に使用鍋のサイズ拡大・漏れ磁束の低減があげられている[3]。この技術課題の改善策を検討すべく, 筆者らは鍋の大きさが漏れ磁束と加熱効率に及ぼす影響を実験により明らかにしてきた。その結果, 加熱コイルとほぼ同等の大きさの鍋を使用すると漏れ磁束が

少なく, 加熱効率が高くなることが判明した[4]。以上の結果を踏まえて, 従来の IH クッキングヒータに用いられている加熱コイルを同心円に分割 (内側コイル, 外側コイル) して駆動する方式 (以下, 分割コイル方式 IH) を考案し, 報告してきた[5]。そして, 提案方式の漏れ磁束低減の効果を実験により明らかにしてきた[6]。

本論文では, 今まで報告してきた実験結果[4-6]を総括し, 有限要素法(Finite Element Method :FEM)シミュレーションにより解析した磁束分布との比較を行った。その結果, 実験結果とシミュレーション結果の整合性がとれ, シミュレーションにおいても, 分割コイル方式 IH クッキングヒータの漏れ磁束低減効果が検証できたので報告する。

2 IH クッキングヒータ

IH クッキングヒータは, 電磁誘導によって鍋に渦電流を流して鍋が自己発熱する調理器である。技術課題は, 「オールメタル対応」・「浮力低減」・「使用可能鍋のサイズ拡大」・「漏れ磁束の低減」などがあげられている[3]。これらの問題から本研究では, 「使用可能鍋のサイズ拡大」・「漏れ磁束の低減」を取り上げる。上記の問題は, 使用する鍋の大きさによって漏れ磁束が増加し, 鍋に鎖交する磁束が減少してしまうため, 加熱効率が低下することである。したがって, 効率よく使用できる鍋の大き

連絡先: 奥山 耕平, 〒163-8677, 新宿区西新宿 1-24-2
e-mail:cm10009@ns.kogakuin.ac.jp

^{*1}工学院大学 ^{*2}サレジオ工業高等専門学校

さが限定されている。そこで、鍋の大きさによって漏れ磁束が変化しない駆動方式の登場が期待されている。

3 IH クッキングヒータにおける漏れ磁束と加熱効率

本章では、技術課題である「使用可能鍋のサイズ拡大」と「漏れ磁束低減」の改善点を把握するために、鍋の大きさが漏れ磁束と加熱効率に与える影響を解明する。

3.1 IH クッキングヒータにおける漏れ磁束と加熱効率

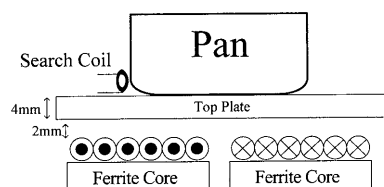
IH クッキングヒータと大きさが異なる三層ステンレス鍋を用いて、鍋の大きさが漏れ磁束（サーチコイル電圧）に与える影響を実験により明らかにした。

3.1.1 実験方法

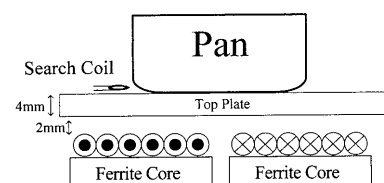
サーチコイルを用いて、Fig. 1 のように異なる大きさの鍋を加熱した場合の漏れ磁束を測定した。使用した加熱コイルは $\phi 17\text{ cm}$ であり、鍋の大きさは $\phi 14\text{ cm}$, $\phi 16\text{ cm}$, $\phi 18\text{ cm}$ である。鍋は加熱コイル上 6 mm （トッププレート： 4 mm ，加熱コイルとトッププレート間 2 mm ）の位置に配置した。測定箇所は、磁束が集中するフェライトコアの上部とし、鍋端部からトッププレートの端部までを測定した。

3.1.2 実験結果

Fig. 2 に異なる鍋で加熱した場合のサーチコイル電圧を示す。ここでは、漏れ磁束の大小を比較することを目的としているので、サーチコイルに誘起される電圧を示している。ただし、グラフの縦軸は、水平方向と垂直方向のサーチコイル電圧を式(1)によってベクトル合成した値である。



(a) Measurement of horizontal direction leakage magnetic flux



(b) Measurement of vertical direction leakage magnetic flux

Fig. 1 Measurement of the leakage magnetic flux in the pan circumference by search coil.

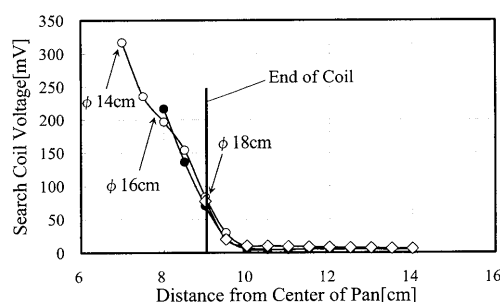


Fig. 2 The leakage magnetic flux by the different pan.

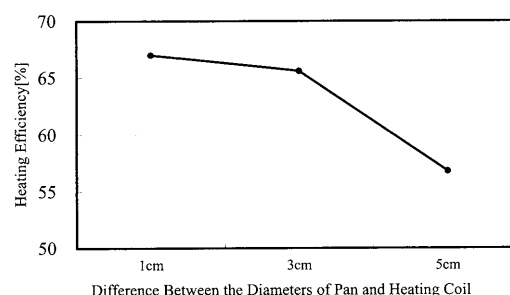


Fig. 3 Heating efficiency depending on the size of pan.

$$v = \sqrt{v_v^2 + v_h^2} \quad (1)$$

ただし、 v ：合成サーチコイル電圧[V]， v_v ：垂直方向のサーチコイル電圧[V]， v_h ：水平方向のサーチコイル電圧[V]である。

Fig. 2 より、加熱コイルよりも鍋の直径が小さいと漏れ磁束が多くなっていることを確認できる。

3.2 鍋の大きさが加熱効率に与える影響

3.2.1 実験方法

異なる大きさの鍋を加熱した場合の加熱効率を以下①～④の手順で測定した。なお、使用した加熱コイルは $\phi 17\text{ cm}$ であり、鍋は $\phi 14\text{ cm}$, $\phi 18\text{ cm}$, $\phi 22\text{ cm}$ の三層ステンレス鍋である。

- ①400 ml の水を鍋に入れ蓋をする。
 - ②水の初期温度を測定する。
 - ③加熱コイルの中心に鍋を置き 200°C 設定で加熱する。
 - ④沸騰するまでの加熱時間と加熱電力を測定する。
- 加熱効率 η は式(2)から求めた。ただし、 Q [J]：水の量， T_1 [$^\circ\text{C}$]：初期温度， T_2 [$^\circ\text{C}$]：到達温度， VI [kW]：加熱電力， t [h]：加熱時間である。

$$\eta = \frac{Q(T_2 - T_1)}{860 \times VI \times t} \times 100[\%] \quad (2)$$

3.2.2 実験結果

Fig. 3 に大きさの異なる鍋を加熱した場合の加熱効率の測定結果を示す。Fig. 3 より加熱コイルと鍋の直径の差が小さくなるほど効率が良くなるのがわかる。

4 分割コイルを用いた IH クッキングヒータの提案

3 章より、加熱コイルと鍋の直径差が小さいと、漏れ磁束低減および加熱効率改善できることが判明した。この点に着目し、分割コイル方式 IH クッキングヒータを考案した。本章では、分割コイル方式 IH クッキングヒータの概要について述べる。

4.1 分割コイル IH クッキングヒータの原理

分割コイル方式 IH クッキングヒータは、Fig. 4 のようにコイルを同心円状に分割し、内側コイルと外側コイルに分け加熱する方式である。分割コイル方式 IH クッキングヒータで小鍋を使用するときは、Fig. 5(a)のように内側コイルのみを駆動して小鍋底面と加熱コイルの直径を

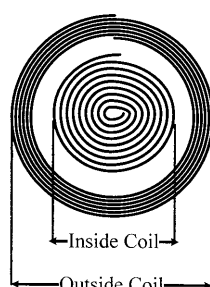


Fig. 4 Structure of divided heating coil.

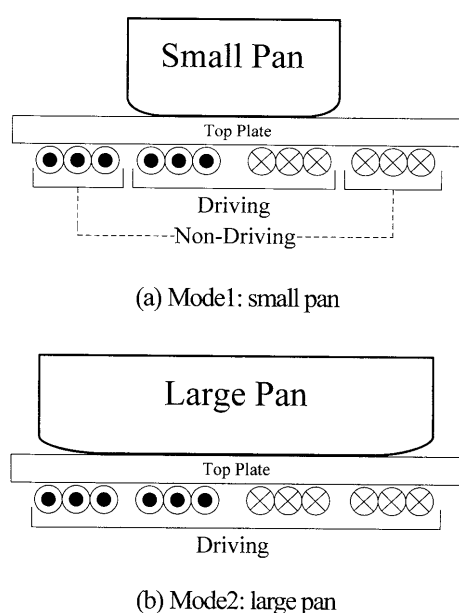


Fig. 5 Principle of proposed type.

合せて加熱する。大鍋を使用するときは、Fig. 5(b)のように内側コイルと外側コイルを駆動して大鍋底面と加熱コイルの直径を合せて加熱する。このように、鍋の直径に合わせて駆動する加熱コイルを切り替えて使用することにより、加熱コイルと鍋の直径の差が小さくなり漏れ磁束の低減と高効率加熱が期待できる。

4.2 分割コイル IH クッキングヒータの回路

Fig. 6 に分割コイル方式 IH の回路を示す。これは、内側コイルと外側コイルおよび共振用コンデンサをスイッチで切り替えるものである。内側コイルのみを使用するときは、Fig. 6(a)のように外側コイルを開放状態にする。また、外側コイルと内側コイルの両方を駆動するときは、Fig. 6(b)のように直列接続する。この接続方法を用いれば、内側コイルと外側コイル間に相互誘導が生じないので、Fig. 6(a)(b)の共振周波数を一致させるのが容易である。

ただし、 L_{1pan} : 鍋を載せたときの内側コイル、 L_{2pan} : 鍋を載せたときの外側コイル、 $L_{pxn} = L_{1pan} + L_{2pan}$ 、 L_2 : 鍋を載せていないときの外側コイルのインダクタンスとする。

4.3 諸定数の算出

分割コイル方式 IH クッキングヒータは、小鍋使用時と大鍋使用時でコンデンサの個数が変化する。それに対して、Fig. 6(a)(b)どちらの場合でも駆動周波数が変化しないため、損失低減のために各回路で共振周波数を合わせる必要がある。そこで、共振用コンデンサの静電容量を算出することにより共振周波数を合わせることを行なった。式(3)~(8)に共振周波数を合わせるための諸定数を算出する方法と算出式を示す。

4.3.1 算出方法

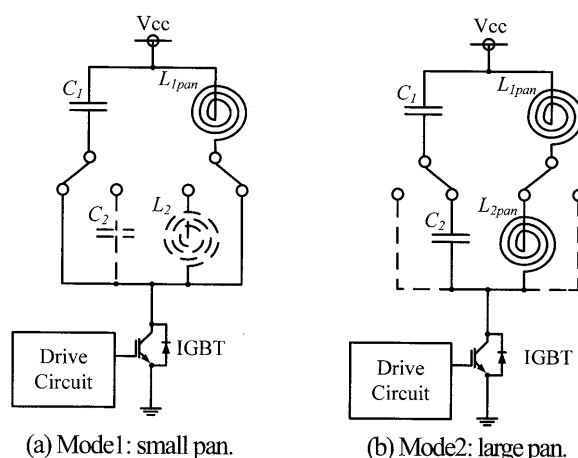


Fig. 6 Circuit of a divided heating-coil type IH cooking heater.

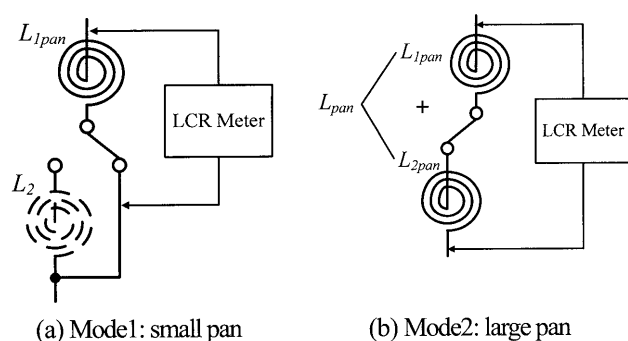


Fig. 7 Measurement of inductance.

Fig. 7 に算出回路を示す。小鍋使用時は Fig. 7(a) のように内側コイルと同等の直径の鍋を載せて LCR Meter を用いて L_{1pan} のインダクタンスを測定する。同じように大鍋使用時は, Fig. 7(b) のように外側コイルの直径と同等の直径の鍋を載せ LCR Meter を用いて, L_{pan} のインダクタンスを測定する。測定されたインダクタンスの値を後述する式(5)(8)へ代入して共振周波数を合せるためにコンデンサの静電容量を算出する。

4.3.2 諸定数の導出

分割コイル方式 IH クッキングヒータは, 小鍋加熱時 L_{1pan} と大鍋加熱時 L_{pan} において, 共振周波数を一致させる必要がある。したがって, 式(3)を定義する。

$$f_1 = f_2 = 40[\text{kHz}] \quad (3)$$

ただし, f_1 [kHz]: Fig. 6(a)の共振周波数, f_2 [kHz]: Fig. 6(b)の共振周波数である。Fig. 6(a)は, L_{1pan} と C_1 で構成される並列共振回路なので, 共振周波数 f_1 は式(4)になる。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{1pan}C_1}} \quad (4)$$

ただし, L_{1pan} [H]: 鍋使用時の内側コイル, C_1 [F]: 内側コイルと共振させるコンデンサである。したがって, 共振用コンデンサ C_1 の値は式(4)を変形して

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi f_1)^2 L_{1pan}} \quad (5)$$

同じように, Fig. 6(b)は, $L_{1pan} + L_{2pan}$ と $C_1 // C_2$ で構成される並列共振回路なので, 共振周波数 f_2 は式(6)のようになる。

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{pan}C'}} \quad (6)$$

ただし, L_{pan} [H]: $L_{1pan} + L_{2pan}$, C' [F]: $C_1 // C_2$ である。共振用コンデンサ C' の値は式(6)を変形して

$$C' = \frac{1}{(2\pi f_2)^2 L_{pan}} \quad (7)$$

C' は $C_1 // C_2$ となっているため, 式(4)と式(6)より, C_1 と C' が決まると, 式(8)より C_2 が算出できる。

$$C_2 = \frac{C'C_1}{C_1 - C'} \quad (8)$$

以上により, 分割コイル方式 IH クッキングヒータの共振周波数に関するコンデンサの静電容量の算出が可能になる。

5. 提案方式の漏れ磁束低減効果

分割コイル方式 IH クッキングヒータによる漏れ磁束の低減効果を実証するために, $\phi 14$ cm の鍋を加熱し, 従来の IH クッキングヒータと漏れ磁束を比較した。加熱コイルは, 従来の IH クッキングヒータと分割コイル方式 IH クッキングヒータで巻き数などの諸条件が異なるため, Fig. 6(b)を従来の IH クッキングヒータとして実験を行なった。

5.1 実験方法

Fig. 1 のようにサーチコイルを用いて, 漏れ磁束の測定を行った。測定する際, 鍋は加熱コイル上 6 mm (トッププレート: 4 mm, 加熱コイルとトッププレート間 2 mm) の位置に配置した。測定範囲は, 鍋端部から水平方向に 5 mm 間隔で, トッププレートの端部までとした。ただし, 測定にはサーチコイルを用いており, 測定箇所は磁束が集中するフェライトコアの上部となっている。駆動条件は, 駆動周波数 20 kHz, 駆動電圧は直流 125 V である。

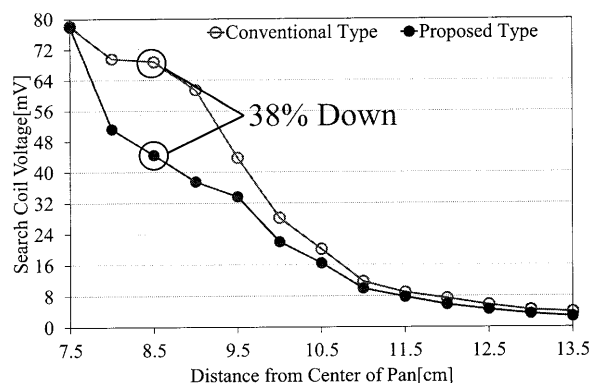
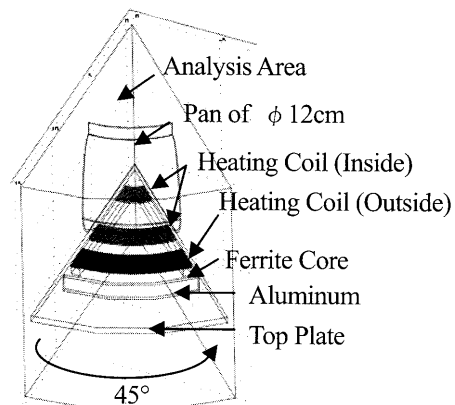


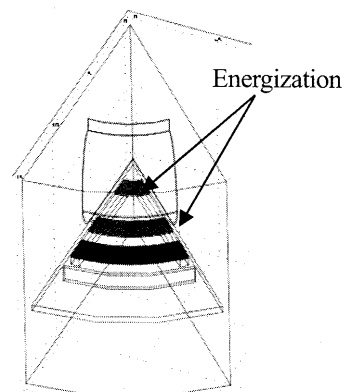
Fig. 8 The leak magnetic flux of proposed type and conventional type.

5.2 実験結果

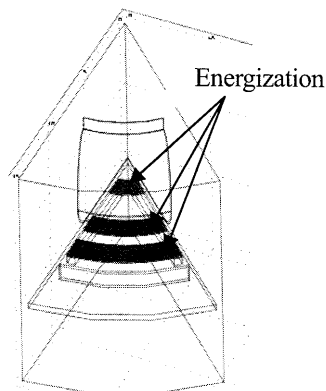
Fig. 8 に従来方式と提案方式の漏れ磁束を示す。なお、結果に示す値は、グラフの縦軸は水平方向と垂直方向のサーチコイル電圧を式(1)によりベクトル合成した値を用いている。Fig. 8 より、従来の IH クッキングヒータと比べて分割コイル方式 IH クッキ



(a) General architecture



(b) Proposed type



(c) Conventional type

Fig. 9 Analysis model.

ングヒータは漏れ磁束を最大で約 38 %低減できたことが確認できる。

6 FEM シミュレーションによる検証

Fig. 9 に示す解析モデルを用いて、FEM 解析を行い、提案法の漏れ磁束低減効果を検証する。そして、5 章で示した実験結果と比較することで、漏れ磁束低減効果の妥当性を検討した。ここでは、分割コイル方式 IH クッキングヒータの漏れ磁束低減効果を実証するために、φ12 cm の鍋を用いて従来の IH クッキングヒータの漏れ磁束と分割コイル方式 IH クッキングヒータの漏れ磁束を比較している。なお、巻き数やコイル径が異なると発生する磁束自体が変わってしまうので、今回は Fig. 6(b)を従来の IH クッキングヒータと見立てて議論を行っている。解析は、有限要素法ベースの汎用工学シミュレーションソフト“COMSOL Multiphysics” (COMSOL 社製)を用いた。Table 1 に解析条件を示す。負荷は、ほうろろ鍋をモデリングした。シミュレーション範囲は、コンピュータの性能を考慮して中心から 45 度の領域に設定した。なお、要素の形状は、三角形 (要素数: 141561 (提案方式), 172172 (従来方式)), 駆動周波数は 20 kHz, 駆動電流は 5 章の実験値より 3.018 A (提案方式), 1.637 A (従来方式) である。

6.1 シミュレーション結果

Fig. 10 にシミュレーション結果を示す。提案方式の方が従来方式に比べて鍋の外側に漏れる磁束が少ないことがわかる。

Fig. 11 に従来方式と提案方式における漏れ磁束のシミュレーション結果を示す。Fig. 11 より従来方式に比べ提案方式では最大で 85 %漏れ磁束が低減していることがわかる。

Fig. 12 にシミュレーション結果と実験値の比較結果を示す。シミュレーション結果は、鍋端部からトッププレートの端部までとし、フェライトコアの上部の漏れ磁束を示している。なお、実験ではサーチコイルに

Table 1 Analysis condition.

	X-axis[mm]	Y-axis[mm]	Relative magnetic permeability μ_r
Analysis area	150	150	1
Pan of φ12cm	60	76	4000
Top plate	140	4.0	1
Heating coil (inside)	49.5	0.57	1
Heating coil(outside)	15.5	0.57	1
Ferrite core	55	5.0	3200
Aluminum	5	5.0	1

誘起された電圧で漏れ磁束の大小を表している。一方、シミュレーションでは、磁束密度で漏れ磁束を表している。そこで、両方の最大値を 100 %とした相対磁束分布(Relative Magnetic Filed Distribution : RMFD)で比較を行う。Fig. 12 より、シミュレーション結果と実験値の差は最大で 20 %あるが、計算対象の空間の構造が複雑なことや、実験の誤差を考慮すれば十分に正確な磁界分布曲線が得られたといえる。

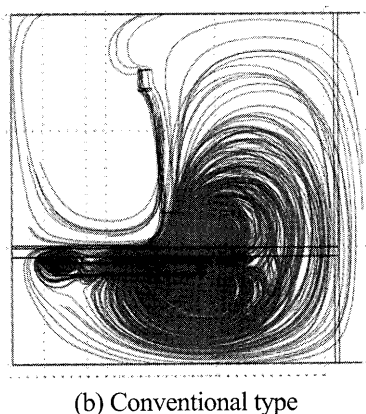
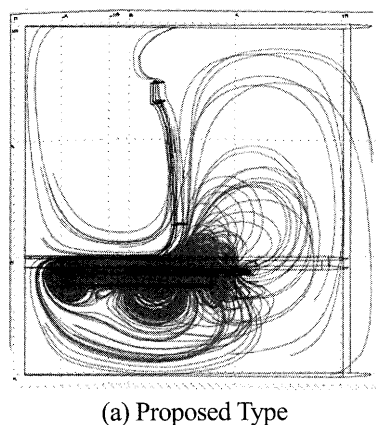


Fig. 10 Result of simulation.

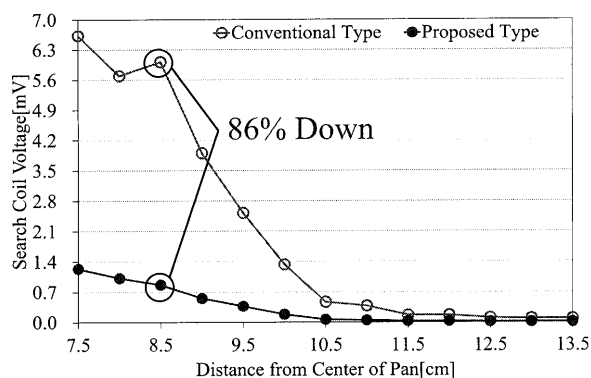
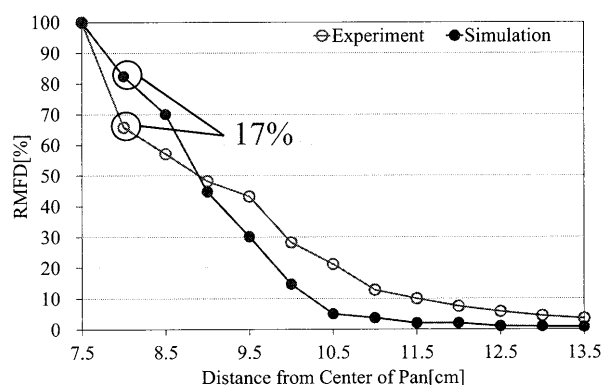


Fig. 11 Comparison of leakage magnetic flux.

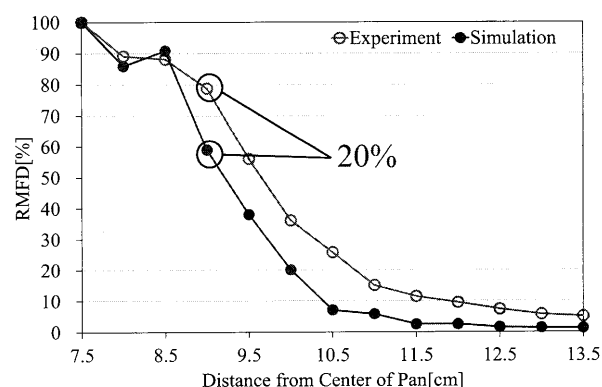
7 結言

本論文では、分割コイル方式 IH クッキングヒータの漏れ磁束低減効果を FEM シミュレーションによって解析した。そして、今まで報告してきた実験的研究の結果と比較した結果、実験結果との整合性がとれ、シミュレーションにおいても漏れ磁束低減効果が得られた。

今後は、分割コイル方式 IH クッキングヒータの加熱コイル分割数や大きさを変えたシミュレーションを行い、漏れ磁束をさらに低減できる形状や方法を検討していく予定である。



(a) Proposed type



(b) Conventional type

Fig. 12 Comparison of experiment and simulation.

(2011 年 3 月 31 日受付, 2011 年 9 月 13 日再受付,
2011 年 9 月 26 日再々受付)

参考文献

- [1] 荻本和彦, 総論: 低炭素社会に向けた住宅用電力需給技術と電力システムの展望, 電気評論, pp.7-14, 2009.
- [2] 三菱電機, 家庭用 IH クッキングヒータ技術, 三菱電機技報, Vol. 80, No. 11, pp. 57-60, 2006.
- [3] 小佐野義博, 鈴木浪平, IH クッキングヒータの技術動向, 電学誌, Vol. 125, No. 4, pp. 221-224, 2005.
- [4] 兒玉博之, 奥山耕平, 米盛弘信, 仁田周一, IH クッキン

グヒータの加熱コイルと鍋の直径が漏れ磁束と加熱効率に与える影響, 八王子産学公連携機構第 8 回研究成果発表講演会要旨集, pp. 208-209, 2008.

- [5] 奥山耕平, 兒玉博之, 米盛弘信, 仁田周一, 分割コイル方式 IH クッキングヒータの加熱コイルが共振周波数に与える影響, 八王子産学公連携機構第 8 回研究成果発表講演会要旨集, pp. 206-207, 2008.
- [6] 奥山耕平, 兒玉博之, 米盛弘信, 仁田周一, 分割コイル方式 IH クッキングヒータの漏れ磁束低減効果, 第 21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 523-524, 2009.