

IHクッキングヒーター開発への 熱・電磁界連成解析技術の適用

下畑賢司*
稲口 隆*

Application of Coupled Analysis of Thermal and Electromagnetic Field to Development of IH Cooking Heaters
Kenji Shimohata, Takashi Inaguchi

要 旨

IH(Induction Heating)クッキングヒーターは、ガラス天板の下に配置した加熱コイルに高周波電流を流し、加熱コイルで発生した磁場を鍋に鎖交させ、鍋に誘導される渦電流発熱で鍋を加熱する調理器である。火を使わず鍋自体を加熱するため、安全・高効率な調理器であるとともに、トッププレートがフラットなため手入れが容易という特長を持っている。

加熱コイルの最適化には、コイル仕様、駆動電流や鍋発熱特性の知見が欠かせない。さらに、調理機能への展開には、鍋の温度や調理物の対流の知見が有用と考えられる。

本稿では、IHクッキングヒーターを対象として、熱・電磁界連成解析の計算手法を開発し、計算結果の妥当性を検証した結果を述べる。

(1) 電磁界・電気回路連成解析

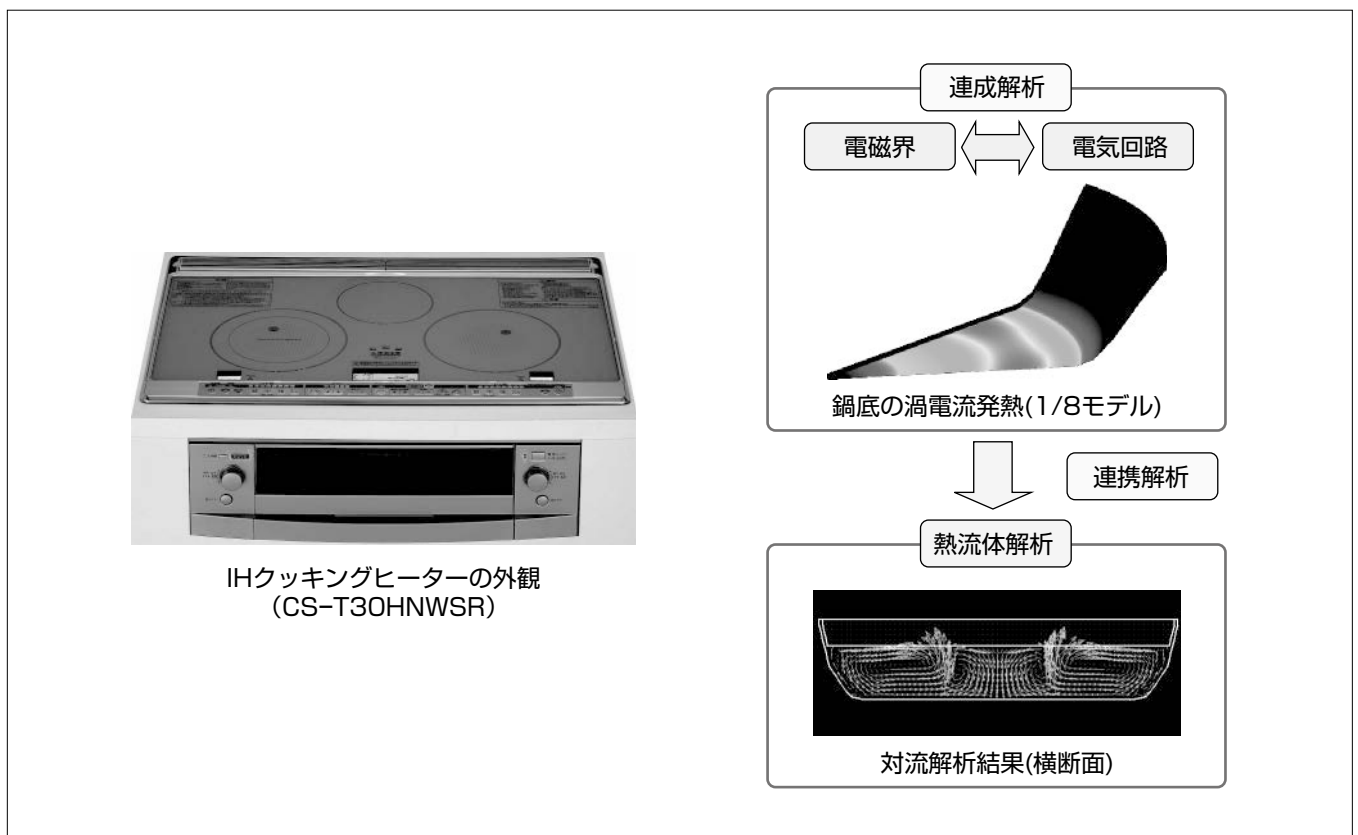
コイルの巻数や配置、フェライト、アルミ製の防磁リング、駆動回路を模擬した電磁界と電気回路の連成解析で、コイル電流、鍋発熱分布を高精度に計算することができる。

(2) 熱流体解析

電磁界解析で算出した発熱分布を入力条件とした熱流体解析によって、鍋温度分布や水などの内容物の対流挙動を計算することが可能である。

(3) 調理機能への適用

熱・電磁界連成解析手法を、代表的加熱コイルであるトリプルリング型加熱コイルの対流煮込み加熱に適用し、その有用性を確認した。



IHクッキングヒーターへの熱・電磁界連成解析

誘導加熱を利用した調理器であるIHクッキングヒーターを対象に、熱・電磁界の連成解析を適用した。まず、電磁界と電気回路の連成解析で、コイル電流や鍋発熱分布を計算する。この発熱分布を入力条件とした熱流体解析によって、鍋温度分布や水などの内容物の対流挙動を計算することが可能となった。この手法をトリプルリング型加熱コイルでの対流煮込み加熱に適用し有用性を確認した。

1. ま え が き

IHクッキングヒーターは、加熱コイルで高周波磁場を発生させ、鍋に誘導される渦電流発熱で鍋を加熱する調理器である。一連の調理特性を検討する際、鍋の渦電流発熱、鍋温度変化など実際の動作を模擬したシミュレーションが有効である。鍋の渦電流発熱の検討には、鍋に高周波磁界を印加する加熱コイルの巻線、フェライト、アルミ製の防磁リング、鍋を含めた過渡電磁界解析が適用できる。このとき、LC共振回路で駆動されるコイル電流を計算するためには、電気回路を電磁界解析と連成させて計算する必要がある。さらに、調理時の温度分布や液体の対流特性の検討には、電磁界解析で計算した発熱と、熱流体解析を連携した解析手法を開発する必要がある。

今回、加熱コイル形状と駆動回路をモデル化した電磁界・電気回路連成解析技術を開発し、コイル電流や鍋の発熱分布の計算を可能とした。さらに、電磁界解析で得た鍋発熱の分布を熱流体解析の入力として解析を行うことで、鍋の温度分布や内容物の対流挙動も解析可能となった。

2. 加熱コイルと駆動回路の仕様

図1に、三菱電機製IHクッキングヒーターの代表的な加熱コイルの外観と駆動回路の構成図を示す。加熱コイルは、ガラス製トッププレートの下に配置されている。加熱コイルとしては、主に2種類があり、図1(a)は大径及び小径のリング状コイル(ダブルリングコイル)、図1(b)は大径、中径及び小径のリング状コイル(トリプルリングコイル)で構成している。ダブルリングは、駆動回路によって、コイルのインダクタンス(L)と共振コンデンサ(C)によるLC共振回路で駆動される。トリプルリングでは、2個の駆動回

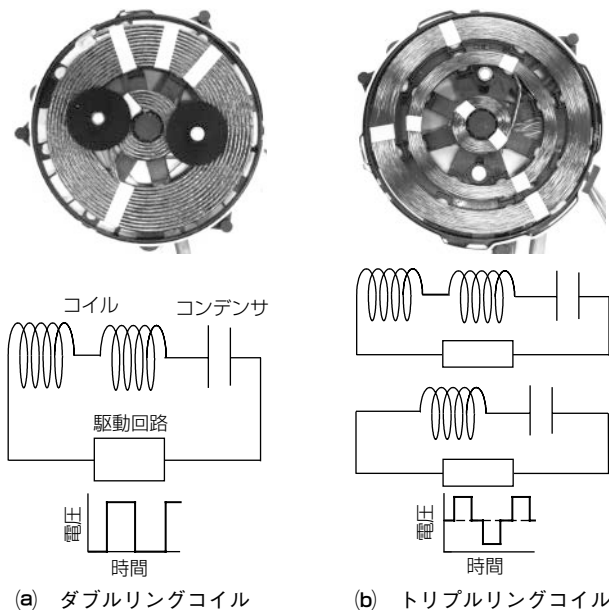


図1. 加熱コイルの外観及び駆動回路の模式図

路を持っており、内側の2個のコイルと外側のコイルを独立に駆動できる特徴を持っている。

3. 電磁界と熱流体の連成解析

3.1 計算手順

電磁界解析と熱流体解析の有限要素法の計算メッシュに互換性を持たせ、電磁界解析で計算した発熱分布の出力データを直接熱流体ソフトで使用できる手法を開発した。電磁界解析のソフトとしてサイエンスソリューションズ株のEMsolution^{(1)(注1)}を、熱流体解析のソフトとして株シーディー・アダプコ・ジャパンのStar-CD⁽²⁾を使用した。電磁界解析で鍋の発熱量を算出し、その発熱量をもとに鍋の温度分布を熱流体解析で計算する。次にその手順を示す。

- ①代表的電流値に対する発熱密度分布を電磁界解析で算出する。発熱密度の絶対値は電流値で変化するが、総発熱量で発熱密度を除して規格化した発熱密度分布は電流に依存しないと仮定する。
- ②回路やコイルの損失による加熱効率(約90%)を考慮して、電力を算出する。
- ③想定した電力時の発熱密度分布は、鍋のトータル発熱量をもとに定数倍して作成する。
- ④③で作成した発熱密度分布を使用して熱流体解析によって温度を算出する。

図2に、鍋、ガラス天板、加熱コイル、フェライト、アルミ製の防磁リングからなる計算モデルを示す。フェライトが配置されており、鍋及びコイルは円筒状であることから、周方向の対称性を考慮したモデルとした。電磁界解析では、鍋底のコイル面側の厚み0.2mm程度の領域に渦電流が集中するため、厚み方向の分割数を大きくする必要がある。一方、熱流体解析ではメッシュのアスペクト比が極端に大きいと発散しやすいこと、及び対象とする計算時間が数十秒から数分レベルと長いことを考慮し、熱解析のメッシュは電磁界解析のメッシュよりも粗くした。このため、熱解析のメッシュには、複数の電磁界解析メッシュを含むため、空間的に発熱密度を平均化した。

(注1) EMsolutionは、サイエンスソリューションズ株の登録商標である。

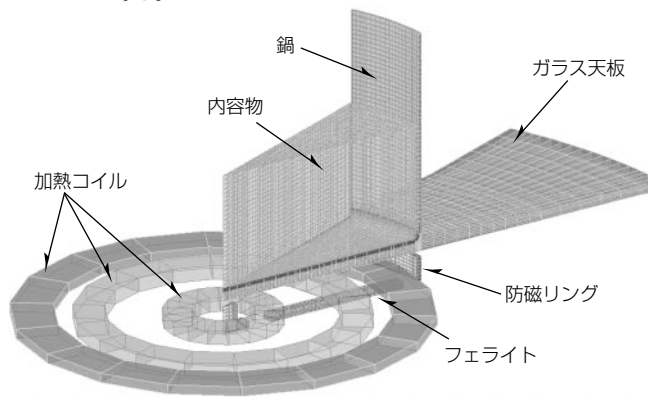


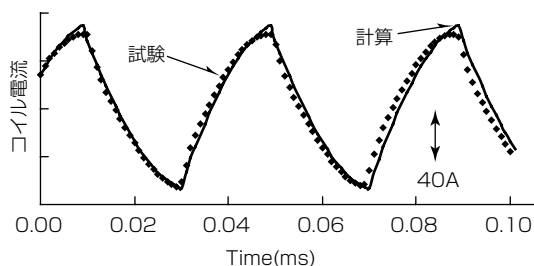
図2. 電磁界解析と熱解析のメッシュモデル

3.2 電磁界・電気回路の連成解析

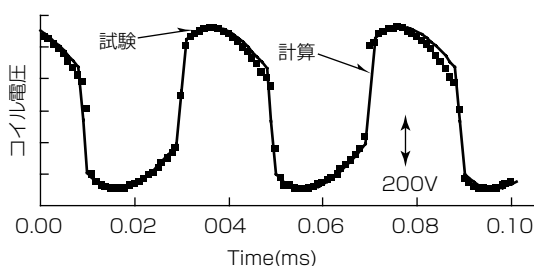
駆動回路は、スイッチング素子のON-OFFによって、約20kHz程度の周波数で、加熱コイルとコンデンサのLC共振回路に電圧印加を繰り返す。これを電磁界解析で模擬するため、電圧源、コイルのインダクタンス、コンデンサからなる等価回路を構成した(図1)。ダブルリングコイルでは、電圧印加と電圧ゼロの繰り返しとし、トリプルリングコイルでは、電圧印加、電圧ゼロ、逆電圧印加、電圧ゼロの繰り返しとした。

図3に、ダブルリングコイルでのコイル電流と電圧の試験結果と計算結果の比較を示す。駆動周波数は25kHzで、電流上昇時がコイルに電圧が印加されている時間、電流減少時は回路電圧がゼロの状態である。一般的な共振回路の正弦波形よりも三角波に近い形であることが特徴である。電流、電圧ともに、試験結果と計算結果はよく一致しており、計算の妥当性が確認できる。

図4に、ダブルリングコイルで鍋底から見た発熱密度分布を示す。発熱量は電源の駆動周波数である数十kHzで増減を繰り返すが、最終的に熱流体解析を実行する際は、数



(a) コイル電流の比較



(b) コイル電圧の比較

図3. ダブルリングコイルでのコイル電流と電圧の試験結果と計算結果の比較

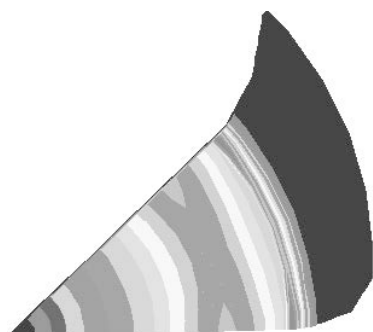


図4. ダブルリングコイルでの鍋底から見た発熱密度分布計算結果(1/8モデル)

十秒から数分レベルの時間を対象とするので、発熱量を時間平均している。発熱分布はドーナツ状であり、鍋の中心は発熱が小さい。また、周方向に発熱密度分布の大小があるのは、コイルの下に棒状のフェライトを配置しているので、フェライト直上に相当する鍋位置での発熱密度が高いためである。

3.3 熱流体解析

熱流体解析の妥当性を検証するため、フライパンを空焚(だ)きした場合の温度分布を試験と計算で比較した。

図5に、フジノス製フライパン(DX22)を火力弱で150秒加熱した場合の温度分布を、サーモビューアで測定した結果を示す。鍋中心では、発熱量が小さいが、鍋の熱伝導によって鍋中心まで温度が上昇している。また、棒フェライトの配置に起因する周方向の温度むらは見られない。

図6は、試験と同じ条件でフライパンを加熱した場合の温度分布の計算結果である。計算では鍋とトッププレートとの接触抵抗、空気対流による放熱、鍋からの輻射(ふくしゃ)による放熱を考慮している。温度分布の計算結果からは、発熱の小さい鍋中心まで温度が上昇していること、及び周方向の温度分布はほぼ均一とみなせることがわかる。

図7は鍋底の温度について、サーモビューアで測定した結果と計算結果を比較したものである。発熱密度が高いと考えられる場所(A)、鍋中央部(B)との2点を比較した。いずれも計算値と測定値はよく一致している。これから、熱・電磁界連成解析の妥当性が検証できた。

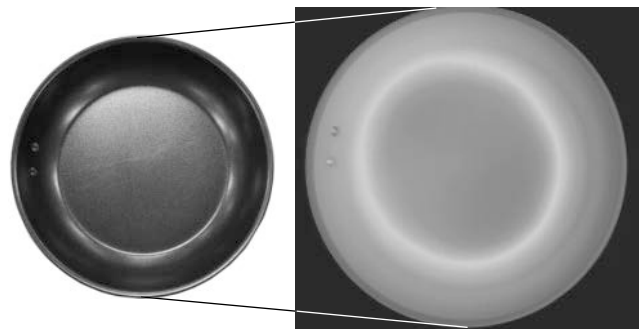


図5. フライパンの外観と加熱時の温度分布試験結果

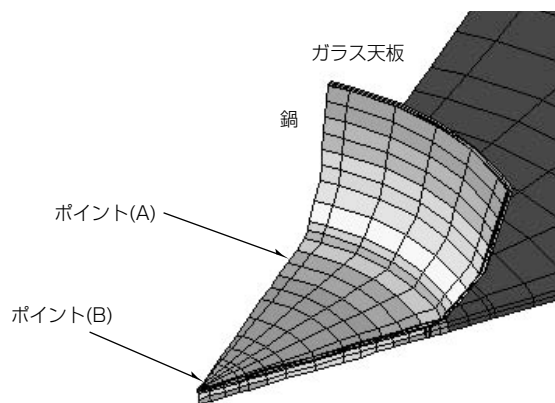


図6. フライパン空焚き時の温度分布計算結果

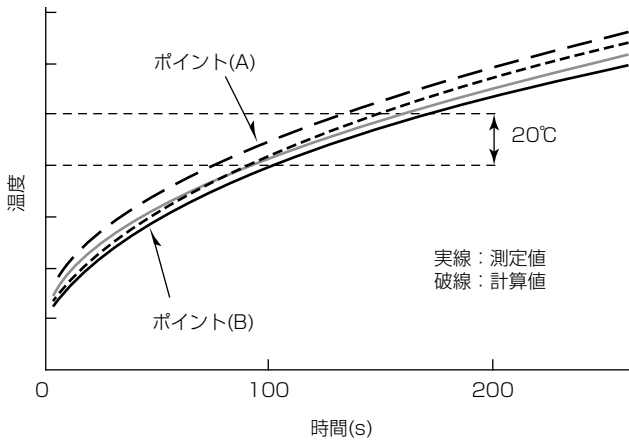


図7. 鍋温度の測定結果と計算結果の比較

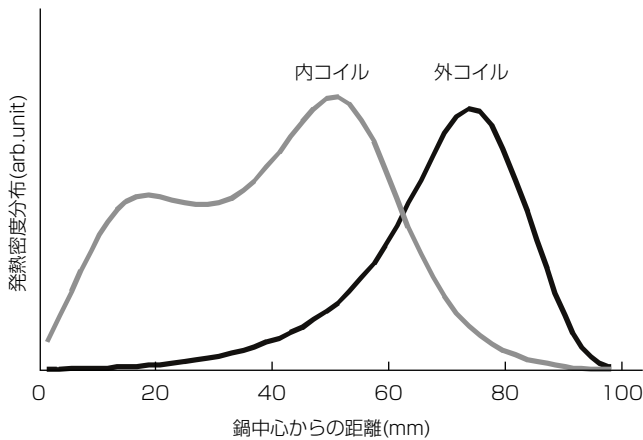


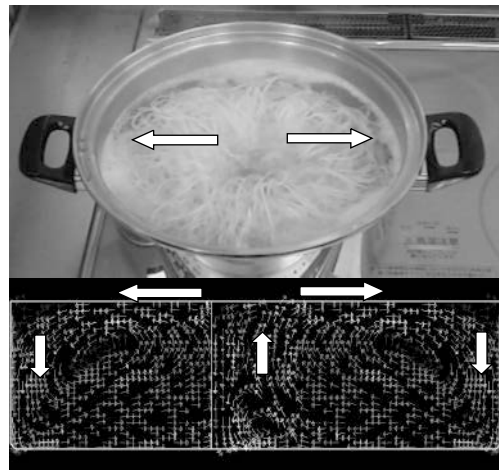
図8. トリプルリングコイルでの内コイル、外コイル単独加熱時の鍋発熱密度分布

4. 熱・電磁界解析の適用例

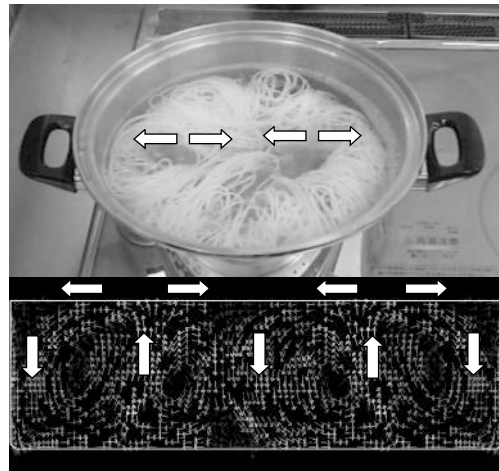
熱・電磁界解析の代表的な適用例として、トリプルリングコイルで、対流煮込み加熱(内側のコイルと外側のコイルを交互に加熱)での結果について述べる。

図8は、トリプルリングコイルで、内コイル単体と外コイル単体で加熱した場合の発熱密度分布を示す。内コイル単体では、鍋中心から半径方向60mm程度の領域を加熱する。外コイル単体では、半径方向70mm程度に発熱のピークがある。内コイル単体と外コイル単体の加熱を、時間的に交互に繰り返した場合の水の流速分布を解析した。

図9は、対流煮込み加熱でそうめんを茹(ゆ)でた場合の写真である。内コイル加熱時(a)は、鍋中心部で上昇し、水面では外周方向に移動し、鍋外周部で沈み込む動きを見せる。一方、外コイル加熱(b)では、鍋中心側と外周側にそうめんが沈み込む様子がわかる。これに対応する解析結果として、図中に、鍋の横方向から見た断面での流速分布を示す。内コイル加熱時は、鍋中心から上昇流が発生し、水面では外周方向に強い流れが生じている。外コイル加熱時は、半径方向中間位置で上昇流が発生し、水面では鍋中心方向



(a) 内コイル加熱時



(b) 外コイル加熱時

図9. トリプルリング加熱コイルでの対流煮込み加熱時の対流挙動

と鍋外周方向への弱い流れとなった。これらから、対流解析結果は実際の動きを反映しているといえる。トリプルリングコイルでの対流煮込み加熱では、内コイル加熱時と外コイル加熱時の強い対流の場所、向きが異なるため、よりかき混ぜ効果が高く、均一に調理できることが確認できた。

5. む す び

電磁界・電気回路連成解析による鍋発熱分布を基に、熱流体解析で調理容器の温度分布や内容物の対流を計算する手法を開発し、この解析手法の妥当性を検証した。また、トリプルリングコイルでの対流煮込み加熱時の対流挙動を検討し、その有用性を確認した。

参 考 文 献

- (1) サイエンスソリューションズ(株)
<http://www.ssil.com/em/EMSolution/ja/index.html>
- (2) (株)シーディー・アダプコ・ジャパン
<http://www.cdaj.co.jp/product/>