

特集

身近な電磁現象

IHで調理可能なフレキシブル&ディスポーザブル容器のうず電流解析

Eddy Current Analysis of a Flexible & Disposable Container for IH Cooker

藤田 萩乃^{*1} (正員)

Hagino FUJITA (Mem.)

We have been studying how to solve eddy currents induced in a thin metal plate by using line integral equations. In this paper, we raise issues over the container for IH cooker. And we also present a method of formulation based on line integral equations in order to lead examinations in electromagnetic aerometry for necessity of the container designing. Moreover we show the advantage by applying the boundary element method and introduce the example of a container for IH cooker by using this method.

Keywords: boundary element method, eddy current analysis, line integral equations.

1 まえがき

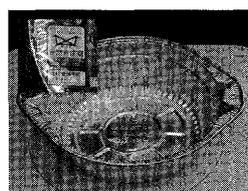
近年、火を使わない安全な調理器として IH (Induction Heating) 調理器が急速に普及し始め、一般家庭だけでなく、店舗厨房や客席、医療施設や介護施設、高層住宅やオフィス、寮、など様々な現場で導入されている。調理に際しては磁性の金属性鍋を使用するのが一般的であるが、購入の目安として「IH 調理器対応」の表示があるのみで、鍋の性能比較や料理への適性などについての情報を一般消費者が得ることはほとんどなく、同じレシピでも全く同じように料理を再現することは難しい。そのため、所望の料理が簡単に再現できる工夫として、食品をパッケージして、単純な操作で調理ができる簡易調理容器の考案と製品化が望まれているが、未だ市場に供されていない。

このような製品によれば、誰でも簡単に所望の料理を卓上で再現でき、できたてを食することが可能となる。介護や給食の現場では人手を増やさずに質の高い食事を供することが可能となり、レストランやコンビニ等のバックヤードでは省人化が期待できる。また、レストランではセルフサービスで卓上で調理を楽しむことができる。さらには食材宅配や弁当サービス、家庭の食卓で、所望の料理を囲むことが可能となる。このような製品が多く流通することで IH 調理器の需要が増え、相乗効果が得られる

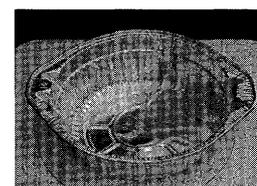
ものと予想される。

食品を内包し、複数回の調理に耐え、フレキシブルでディスポーザブルな誘導加熱容器とするためには、紙または樹脂製の容器に IH 調理器で誘導加熱される発熱体を装着する方法が有望視されている。発熱体は IH 調理器とのマッチングをとるため、金属性鍋と同等のインピーダンスを得る必要があり、導電性薄膜とする方法が考えられる。しかしながら空焚き時は紙または樹脂性の容器を焼損してしまう問題がある。そのため発熱体には容器の耐熱温度を超えたとき、自動的に調理を終了する仕組みを付与する必要がある。これをヒューズ機能と呼ぶ。発熱体にこのような機能を付与するためには、発熱体に誘導されるうず電流の挙動を可視化し、設計の指針とすることが重要となる。

本報では IH 対応容器に関する諸問題を提起し、ヒューズ機能が考案された背景を説明する。さらに、極薄導体である発熱体の設計に必要なうず電流解析について、境界要素法を適用した事例を紹介し、その優位性を説明する。最後に本手法を用いて設計された IH 対応容器の調理例を紹介する。



(a) Before turning on



(b) Melting container

Fig. 1 Aluminum container pan for IH cooker.

連絡先: 藤田 萩乃, 〒100-8522 千代田区内幸町 1-3-1, 東洋製罐株式会社 新規事業部

e-mail: hagino_fujita@toyo-seikan.co.jp

*1 東洋製罐株式会社

2 IH 対応容器のコンセプト

IH 調理器の調理に際しては磁性の金属性鍋を使用するのが一般的であるが、食品をパッケージして流通し、調理に耐え、フレキシブルでかつ廃棄しやすい誘導加熱容器の開発が望まれており、現在、Fig. 1 に示されるようなアルミニウム絞り容器が市場に供給されている。Fig. 1(a) の商品注意書きには IH 調理可能と明記してあり、空焚きに対する注意書きがある。このような容器は空焚きすると Fig. 1(b) に示すように瞬時に溶融発火し飛散する。注意を喚起する表示のあるシュリンク蓋は、使用時にははずされており、不慮の事故が起きる可能性を包含する製品であると言える。本報

で提案する製品は Over Cook 時や IH 調理器スイッチの切り忘れ時などに、万一空焚きしても容器本体を焼損せず、自動的に IH 調理器動作を止めるヒューズ機能を有する。これはヒューズ作動時、IH 調理器とのマッチング領域から外れることによる、機器側の安全機能を利用するものである。

さらに本報で提案する製品はフレキシブルでかつ廃棄しやすく、調理に耐え、金属性鍋と同等以上の加熱効率を持ち、性能上遜色ない調理容器である。

ところで、アルミニウムは水に溶出する。Fig. 1 の容器からは調理中にアルミニウムが多量に溶出するが、アルミニウムを摂取しても毒性が認められないことから、このような調理方法が容認されている。しかしながら、アルミニウム自体に毒性はなくとも、積極的に摂取するものではないとの観点から、著者らの提案する容器はアルミニウムが溶出した食材を食することがないように、水蒸気で調理する「蒸し器」とする。

3 IH 対応容器の従来特許と問題点

IH 対応の鍋及び容器の先行特許は 1980 年代から 2000 件を越える出願があり、現在も増え続けている。Fig. 2 の Category1 に繰り返し使用する鍋の出願例を、Category2 に簡易調理容器の出願例を示す。Category2 の簡易調理容器は、Category2-1 の金属の薄板を容器形状に加工するタイプ、Category2-2 の樹脂や紙製の容器に発熱体を内包するタイプの 2 種類に大きく大別される。Category2-1 は直火用の簡易鍋として古くから流通しており、空焚き時は容易に焼損する。Category2-2 は発熱体を可燃性の容器に内包する構成としているため、容器を焼損から守る必要があり、発熱体を内容物で冷却するさまざまな手法が考案され特許出願されている。しかしながら電磁気学的背景は無く、未だ市場に供給するに足る製品も無い。筆者らが提案する容器は Category2-2 に属する。Category2-2 の中でも安全機能が付与されている特許を Category2-2(with fuse) に示す。これによれば、安全機能は発熱体の中心から外周部にかけて局部的に幅狭部を設けることにより、幅狭部のうず電流密度を大きくすることで極高温にし、溶断させず電流を遮断するものである。しかしながらこの方法では発熱体溶断時にアルミニウムが飛散し、溶断部に接する容器が溶融する。さらに幅狭部を有しているため十分な発熱量が得られないという問題もある。

これらの問題に鑑み、筆者らは極高温部を設計す

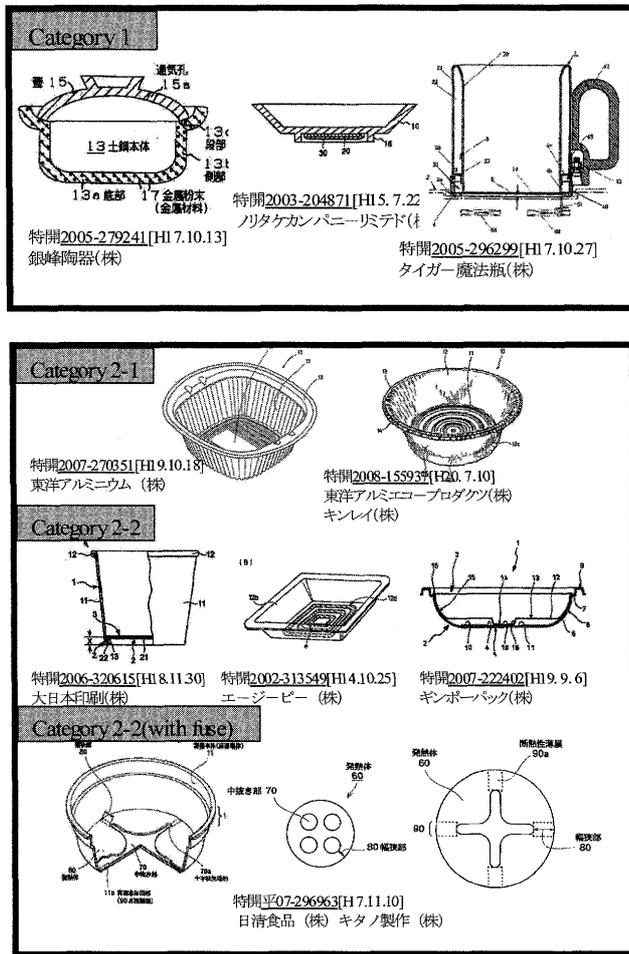


Fig. 2 Example of prior patent.

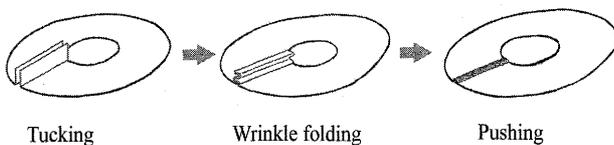


Fig. 3 Fabrication process of fuse portion.

る際、幅狭部のうず電流集中によるのではなく、発熱体のうず電流経路の一部の抵抗値を大きくする方法とした。抵抗値の異なる箔材を接合することは工業的に困難なため、Fig. 3 に示すように箔材を一旦切断し、再接合した。接合部の接合方法により、抵抗値を決めることが可能となる。接合方法は食品用途であることを考慮すれば、接着剤は使用せず、物理的に圧着する方法が望ましい。うず電流が流れると圧着部は反発するため、強い勘合力が求められる。そこで、十分な表面積でランダムにしわ折りし、圧着接合することで接合部を形成した。この方法によれば、強い勘合力が得られ、さらに幅狭部がないため十分な発熱量を得ることが可能となる。

以上のことから、ヒューズ機能を持つ発熱体の設計には、穴が穿たれ、切断部または接合部のある極薄導体のうず電流問題を解く手法が必要とされる。

4 電磁界解析手法の検討

4.1 IH 対応容器用発熱体の特徴

近年、主として数値解析に用いられている手法は有限要素法であるが、有限要素法によるモデリングには非効率な場合もある。

IH 対応容器用発熱体は極薄板で穴が穿たれ、非対称に切り欠き、接合部を有する。また IH 調理器は台所の開放空間に設置される。これらの事実を鑑みれば、極薄板のためアスペクト比が極端に大きいこと、対象性のないフルモデルであること、現象が無遠慮まで及ぶことを考慮する必要があり、これらの特徴に適した、簡便で精度のよい手法が求められる。そこで、次の 4 点について有限要素法 (FEM) と境界要素法 (BEM) とを比較する。

4.1.1 離散化

FEM では物体が占める全ての領域について離散化を行う。そのためメッシュ生成とそのチェックが難しく、とりわけ物体形状が単純でない場合において多大な時間を浪費してしまう。例えば、空洞が存在する場合、ノッチや角がある場合などは、解の勾配が大きくなるため、高い要素密度が必要となる。

一方、BEM では離散化は物体の境界でのみ行われる。このことは BEM の数値モデリングを容易にするだけでなく、未知数の次数を減らすことも可能にする。

4.1.2 解析領域

FEM において無限領域問題に適用するためには、メッシュに仮想的な境界を構成しなければならない。これは解の精度を下げると同時に、時には見せかけの解や間違った解を導くことにもつながる。

一方 BEM では無限領域を外部問題として簡単に定式化可能である。連続な数学的表現として積分表現を用いているので、無限領域をメッシュ作成することなく任意の点の解を得ることができる。

4.1.3 接点以外の解

BEM では FEM とは異なり、問題としている領域の任意の点および任意の時間の解とその導関数を評価できる。これができるのは、解析領域の問題と同様に連続な数学的表現となっているためである。

4.1.4 極薄板の解

解析対象が極薄板の場合、FEM ではアスペクト比が極端に大きくなる。浸透深さを考慮して厚さ方向の要素を分割しなければならないため透磁率が大きくなる場合、解析周波数が大きくなる場合は精度が劣化する。

一方、BEM では FEM のようにアスペクト比を考慮する必要はないが、未知数を導体の表面にとり、おもて面、裏面についてそれぞれを定式化するため、導体が薄くなるほど 2 式が相互に干渉し合い、方程式が不定となる問題がある。

次節では、BEM にて、この極薄板問題を解決する方法を紹介する。

4.2 境界要素法による定式化の概要

4.2.1 未知数の定義

積分形式による電磁界の表現はマクスウェルの微分方程式にグリーンの定理を適用し、かつストラットンの手法に倣い表面電流 J_s 、表面磁流 K_s を導入し、これらを未知数として扱う [1]。Fig. 4 に厚さ d の導体における未知数の概念を示しておく。表面電流は導体表面に沿う磁界を、表面磁流は導体表面に沿う電界を意味する。

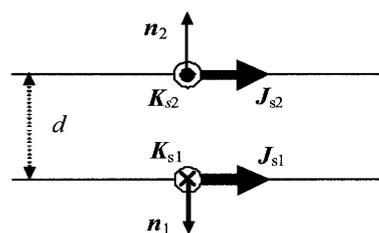


Fig. 4 Surface electric and magnetic current.

導体内の電磁界が導体表面に沿うものに比べ急激に減衰することに着目し、マクスウェルの方程式を解くと、 K_s を J_s の式で表すことができるため、未知数は両表面それぞれの表面電流 J_{s1} 、 J_{s2} となる。表面電流 J_s は導体表面上のベクトルであり2つの成分を持つため、4つの支配方程式を導出する問題となる。

4.2.2 境界要素法に基づく定式化

境界要素法に基づき接線方向の磁界の連続条件から2本の式を、法線方向磁束密度の連続性から1本の式を導出する。さらに、解析が必要な周波数では電流は導体板から飛び出すことはないことから、表面電流 J_s が発散しない条件を追加する。以上の式から未知数を決定することが可能となる。ここで、4.1.4節の極薄板問題が浮上する。

4.2.3 極薄板にも適用可能とする方法

未知数の和と差をとり、新たな未知数とすることで、厚みを概念として残したままこの問題を解決する。この手法によれば実際に厚みがゼロの場合でも計算可能である。また、ここで導入した新たな未知数である「差」は導体に吸い込まれる磁界と発散される磁界の総和であり、単位幅あたりの磁束として扱うことができる。一方「和」は、 J_s が磁界の概念を持つ等価的な電流であるのに対し、導体板の単位幅あたりに流れる真の電流を表す。この新たな未知数の導入により厚みの概念を失うことなく、薄板問題を解決することが可能となる。この手法は薄板だけでなく、塊状の導体でもそのまま扱うことができる[5]。

4.2.4 離散化と要素分割

離散化に際しては表面電流の代わりに変位電流がゼロである条件を満たすループ電流を導入し、面積分を線積分に変換する。線積分は積分公式に帰着できるため、数値積分の必要はなく高精度の結果が得られる。さらに、透磁率等の材質の性質や波数は定数化され、公式に代入するように解を得ることが可能となる。詳細な定式化の過程については文献を参照されたい[2-6]。

要素については対象物の片側表面のみを分割すればよい。導体表面の未知数が得られれば、対象物内部の任意の点や、空間の任意の点における解を得ることができる。

本手法は簡便で高精度に任意の点の解を得ることが可能な強力な手法である。

4.3 FEM と BEM の精度比較

4.3.1 接線方向の電磁界

4.2.2項で、接線方向の電磁界の連続性より式を導いた。これは導体と空間の境界では、空間側から見た導体表面の電磁界と、導体側から見た導体表面の電磁界が等しいことに着目している。したがって、得られた解析結果も、導体と空間の境界で電磁界の値が等しくなるはずである。

Fig. 5に解析モデルを示す。簡単のため軸対象モデルとし、導体板は比透磁率200程度のスチールとする。FEMでは導体の厚み方向の要素分割においてアスペクト比が10及び100となるようメッシュを作成した。

Fig. 6に導体の中央から外周に至る各要素の接線方向の電磁界の計算結果を示す。コイルに向きあう表面における磁界を同図(a)に、電界を同図(b)に示す。BEMの結果を△□で示し、FEMの空間に接する導体中の要素を破線で、導体に接する空間中の要素を実線で示す。さらに実数部をReal、虚数部をImagと表記する。なお、アスペクト比を変えても計算結果に違いはなかったためここではアスペクト比10の結果のみを表示している。

Fig. 6より、FEMでは空間の要素と導体の要素では計算結果が一致しない。FEMでは要素間の解を連続して解くことができず、導体内では電磁界は急激に減衰するため、深さ方向に無限に細かく要素分割しないかぎり、導体の表面の電磁界を計算することはできない。導体の比透磁率が大きくなればこの差はさらに大きくなる。

BEMの計算結果はFEMの空間の要素の電磁界とよく一致する。空間の電磁界は減衰しないことから、導体表面の電磁界の値は、FEMでは導体表面に接する空間の要素から求めることになる[4]。

4.3.2 極薄板容器のインピーダンス周波数特性

FEMでは導体の透磁率が大きい場合や周波数が大きい場合、厚み方向の要素分割には浸透深さを考慮する必要がある。

Fig. 7に薄板容器の解析モデルを示す。導体の厚さは0.2mmで、加熱コイルは市販のIH調理器をモデルとし、簡単のため巻数1とし、電流は1ATとした。FEM解析時の要素厚さは周波数20kHzのとき浸透深さの1/2程度になるよう設定した。

Fig. 8に加熱コイルインピーダンス周波数特性を

示す。同図(a)にアルミニウムの特性を、同図(b)にスチールの特性を示す。Fig. 8 より非磁性および磁性導体板とも、低周波側ではインダクタンス変化分、抵抗変化分とも FEM の結果とよく一致しており、高周波になるほどそれぞれの差が大きくなる。このことは FEM では浸透深さが要素厚さの同程度以上になると急激に誤差が生じることに起因していると思われる。

FEM では導体の厚み方向を要素分割する際、浸透深さを考慮すればアスペクト比が極端に大きくなってしまい精度が落ちる。またアスペクト比を考慮して微細に要素分割すれば膨大な計算コストが発生する。

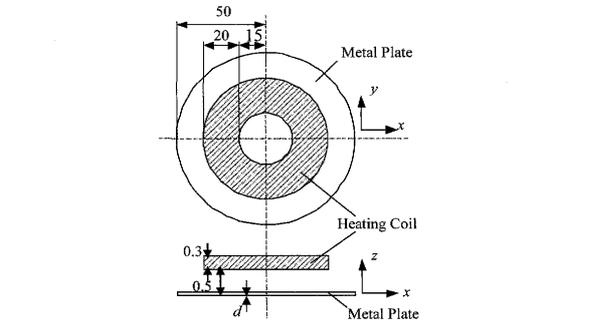
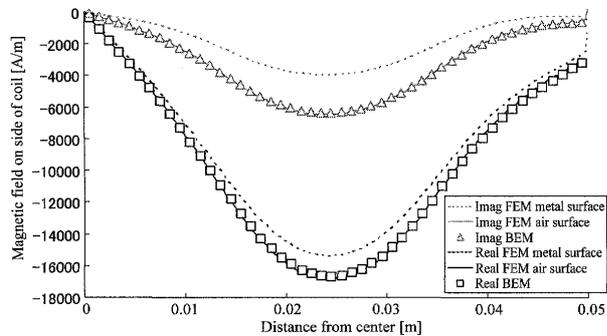
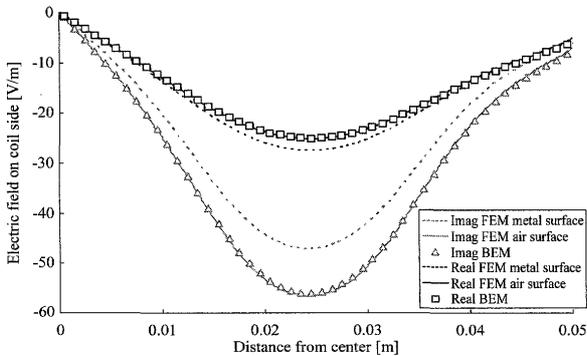


Fig. 5 A model for eddy current analysis.



(a) Magnetic field on the coil side



(b) Electric field on the coil side

Fig. 6 Tangential component of electro magnetic field on steel plate surface.

4.3.3 計算コスト

Table 1 に Fig. 7 モデルの BEM と FEM による計算コストを示す。FEM による解析では対称性を考慮し 1/4 モデルで、BEM による解析ではフルモデルで解析した。BEM の未知数は各要素あたりのループ電流に対し 1

Table 1 Computational cost.

	BEM	FEM(A φ)
Total number of elements	1,040	57,655
Pre-processing time [sec]	3.1	4.9
Equation solving time [sec]	12.7	33.5

Pentium4 CPU 3.60GHz Windows XP pro.

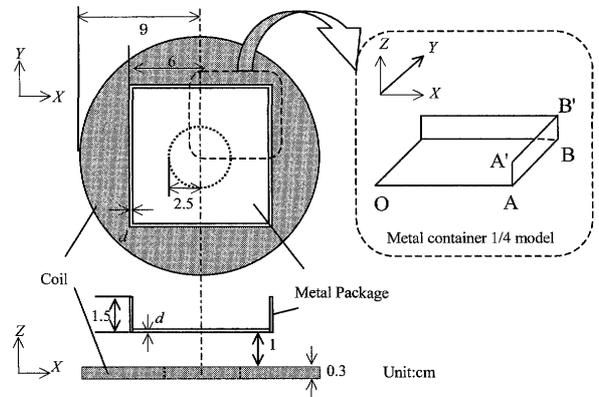
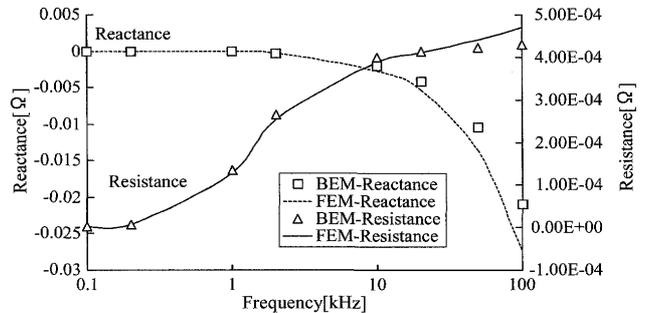
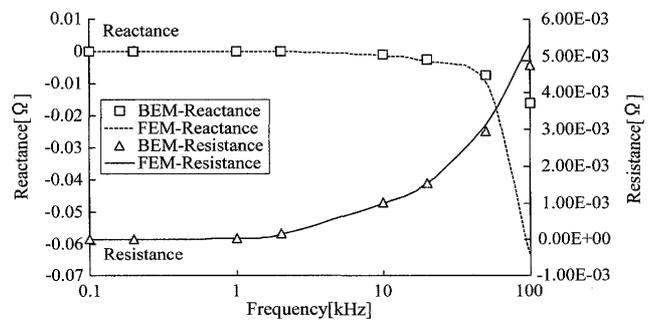


Fig. 7 Eddy current analysis model.



(a) In case of aluminum container



(b) In case of steel container

Fig. 8 Frequency characteristic of impedance change of coil.

つ、表面電流ベクトルに対し2つであり、使用メモリは要素数の3倍となる。

5 IH 対応容器への応用

IH 対応容器の一例として取り上げた蒸し器の容器構成を Fig. 9 に示す。樹脂製または紙製の Bottom トレイに発熱体を装着し、Food トレイに食材を配し、Cover トレイで蓋をする構成とする。発熱体は Bottom トレイと同材の樹脂をラミネート処理して

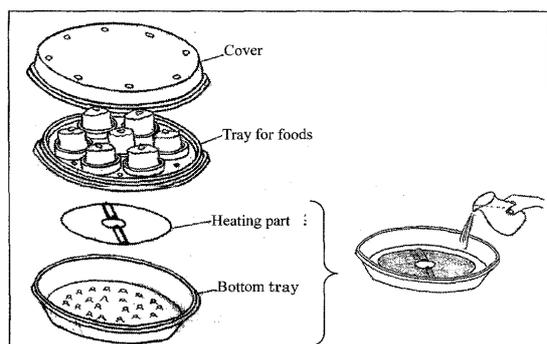
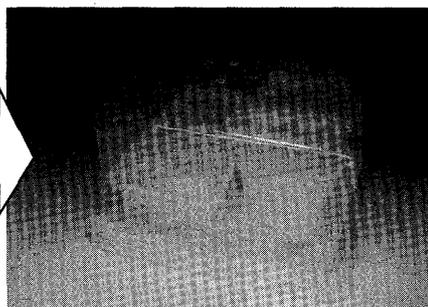


Fig. 9 Main components of the container.



Example 1



Example 2

Fig. 10 Example of containers.

おき、Bottom トレイにヒートシールする。Fig. 10 に容器の調理イメージを示す。食材は野菜、乾物、魚介類、おこわ類、点心、茶碗蒸しや豆腐などを自由に組み合わせ配置する。Fig. 10 の Example1 は弁当をイメージした容器である。また、本容器は蒸し器であるから、Example2 に示すようにアラカルトとして食材を配したり、多段にすることもできる[7]。

6 まとめ

IH 対応容器用発熱体の特徴から、離散化、境界領域、接点以外の解、極薄板の問題を考慮し、BEM が好適であることを説明した。また、境界要素法にもとづき、厚みの概念を包含した新たな未知数を導入することにより極薄板問題を解決する方法を提示し、その新たな未知数の物理的意味を明らかにした。簡便かつ高精度な計算を可能とする本手法は、IH 対応容器の発熱体のうず電流問題を解き容器の設計を容易とした。

本容器は、蒸し器であり、蒸し器のない家庭や、面倒でやらなかった家庭でも手軽に蒸し料理を楽しむことができる。蒸し料理は一度にたくさんの食材を同時に調理でき、素材そのもののおいしさが引き出され、余分な油が落ちヘルシーであるため、グルメ健康志向の昨今の社会風潮にもマッチしている。

本容器は、未だ市場に供されてはいないが、現在も製品化に向け改良を加えられており、今後は一般家庭の他、宅配、介護現場、医療現場、外食産業など、さまざまなシーンでの活用が期待される。

参考文献

- [1] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGRAW-HILL, pp.464-466, 1941.
- [2] K. Ishibashi, *Eddy Current Analysis by Boundary Integral Equation Method*, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.26, No.2, pp.458-461, 1990.
- [3] 藤田, 石橋, 線積分方程式による導体容器の誘導加熱時のうず電流解析, *電気学会論文誌 B*, Vol.127, No.8, pp.929-935, 2007.
- [4] 藤田, 石橋, 境界積分方程式法による薄導体板のうず電流解析, *日本 AEM 学会誌*, vol.15, No.2, 2007.
- [5] 藤田, 石橋, 橋本, 線積分方程式法による切り欠きのある薄板のうず電流解析, *日本 AEM 学会誌*, Vol.16, No.3, 2008.
- [6] 藤田, 石橋, 橋本, 線積分方程式法による穴のある薄板のうず電流解析, *日本 AEM 学会誌* Vol.17, No.1, 2009.
- [7] 藤田, 石橋, 橋本, 線積分方程式法による IH 対応容器用薄導体板のうず電流解析, *日本 AEM 学会誌*, Vol.17, No.2, 2009.