

# 電磁界解析の高精度化技術

電磁界解析の高精度化技術調査専門委員会編

## 目 次

|                            |    |                                  |    |
|----------------------------|----|----------------------------------|----|
| まえがき                       | 3  | 3. 高精度化のための高速計算・並列計算手法           | 51 |
|                            |    | 3.1 空間分割・時間分割併用型並列有限要素法          | 51 |
| 1. 電磁界数値解析の有効利用のための要素技術    | 4  | 3.2 階層型領域分割法による並列解析              | 54 |
| 1.1 磁性材料のヒステリシス特性を考慮した均質化法 | 4  | 3.3 「京」コンピュータによる大規模電磁界解析         | 62 |
| 1.2 古典および異常渦電流損の取り扱い       | 6  | 3.4 過去の求解プロセスを利用した誤差修正法による高速化    | 63 |
| 1.3 磁化の応力依存性               | 7  | 3.5 有限要素の高精度化                    | 65 |
| 1.4 磁性体が受ける電磁力の計算法         | 9  | 4. 高精度化を用いた設計最適化                 | 71 |
| 1.5 EB 対応と EH 対応           | 21 | 4.1 表皮深さに着目した IH 調理器に使用する鍋寸法の設計例 | 71 |
| 2. モデル縮約法                  | 29 | 4.2 随伴変数法（感度解析）によるトポロジー最適化       | 72 |
| 2.1 モデル縮約法の概要              | 29 | 4.3 確率的トポロジー最適化                  | 75 |
| 2.2 Kameari 法              | 30 | 4.4 深層学習を援用したトポロジー最適化            | 78 |
| 2.3 均質化法                   | 44 |                                  |    |
|                            |    | あとがき                             | 83 |

## 電磁界解析の高精度化調査専門委員会委員

|      |                            |     |   |
|------|----------------------------|-----|---|
| 委員長  | 池田 文昭( フォトン )              | 委員  | 中村 悠一( 住友電気工業 )                           |
| 幹事   | 美船 健( 京都大学 )               |     | 野口 聡( 北海道大学 )                             |
| 幹事   | 米津 大吾( 関西大学 )              |     | 羽野 光夫( 山口大学 )                             |
| 幹事補佐 | 菅原 賢悟( 近畿大学 )              |     | 濱田 昌司( 関西大学 )                             |
| 委員   | 阿波根 明( J S O L )           |     | 樋口 大( 信越化学工業 )                            |
|      | 五十嵐 一( 北海道大学 )             |     | 房安 浩嗣( パナソニック )                           |
|      | 生野 壮一郎( 東京工科大学 )           |     | 藤田 真史( 東芝エネルギー<br>システムズ )                 |
|      | 岩下 武史( 北海道大学 )             |     | 藤原 耕二( 同志社大学 )                            |
|      | 植田 浩史( 岡山大学 )              |     | 古屋 篤史( 富士通 )                              |
|      | 上原 裕二( 磁気デバイス研究所 )         |     | 松尾 哲司( 京都大学 )                             |
|      | 梅谷 和弘( 岡山大学 )              |     | 宮城 大輔( 千葉大学 )                             |
|      | 榎園 正人( ベクトル磁気特性<br>技術研究所 ) |     | 宮田 健治( 日立製作所 )                            |
|      | 大場 彰人( デザイア )              |     | 村松 和弘( 佐賀大学 )                             |
|      | 岡田 勉( 村田製作所 )              |     | 李 燦( 日立製作所 )                              |
|      | 岡本 吉史( 法政大学 )              |     | 若尾 真治( 早稲田大学 )                            |
|      | 高 炎輝( 佐賀大学 )               |     | Ebrahimi( サイエンス<br>H a s s a n ソリューションズ ) |
|      | 金山 寛( 日本女子大学 )             |     | ( 途中退任委員を含む )                             |
|      | 亀有 昭久( サイエンス<br>ソリューションズ ) |     |   |
|      | 河瀬 順洋( 岐阜大学 )              | 主な  | 中野 智仁( 日立製作所 )                            |
|      | 北尾 純士( 三菱電機 )              | 参加者 | 佐藤 佑樹( テキサス<br>インスツルメンツ )                 |
|      | 北川 亘( 名古屋工業大学 )            |     | 塚田 彰太( 岐阜大学 )                             |
|      | 黒石 真且( 豊田中央研究所 )           |     | 村下 将也( 岐阜大学 )                             |
|      | 結石 友宏( 住友電気工業 )            |     | 石 禎浩( 京都大学 )                              |
|      | 坂本 宏紀( 明電舎 )               |     | 佐藤 孝洋( 東芝 )                               |
|      | 笹山 瑛由( 九州大学 )              |     | 川野 浩康( 富士通 )                              |
|      | 島 和男( 金沢工業大学 )             |     | 日高 勇気( 三菱電機 )                             |
|      | 島崎 眞昭( 京都大学 )              |     | 石村 祥太( 岐阜大学 )                             |
|      | 進藤 裕司( 川崎重工業 )             |     | 比留間 真悟( 北海道大学 )                           |
|      | 杉浦 靖彦( ミューテック )            |     | 阿部 充志( 日立製作所 )                            |
|      | 杉本 振一郎( 八戸工業大学 )           |     | 山口 忠( 岐阜大学 )                              |
|      | 仙波 和樹( J S O L )           |     | 矢野 博幸( エルフ )                              |
|      | 高橋 康人( 同志社大学 )             |     | 伊藤 泰久( 明電舎 )                              |
|      | 武居 周( 宮崎大学 )               |     | 渡邊 浩太( 室蘭工業大学 )                           |
|      | 田邊 洋一( 富士通ゼネラル )           |     | 佐々木 秀徳( 三菱電機 )                            |
|      | 圓谷 友紀( 福岡大学 )              |     | 大友 佳嗣( 北海道大学 )                            |
|      | 坪井 始( 福山平成大学 )             |     | 徳山 佳央( M & T 社 )                          |
|      | 徳増 正( 東芝インフラ<br>システムズ )    |     | 高橋 篤弘( 豊田中央研究所 )                          |
|      | 徳良 晋( I H I )              |     |   |

## まえがき

電気学会では1977年に「有限要素法による電力機器の電磁界解析法調査専門委員会」が設立され、その後約40年間に示すように多くの調査専門委員会によって様々な電磁界解析技術に関する技術が調査され数値解析技術は大きく進歩した。さらにこの間のコンピュータの発展は著しく計算速度の向上および記憶容量の大規模化により現実の電化製品の形状を3次元でモデル化した数値シミュレーションが可能となった。

一方産業界においてはますますエネルギーの効率化が求められ、電気機器の小型化や高周波化が進み電磁界解析もそれに伴い更なる高精度化が要求されるようになった。それに伴うためにはこれら製品の形状を忠実に再現するだけではなく使用されている磁性体の特性を正確にモデル化する必要がある。また、積層鋼板を使用した製品の過渡応答解析を行う場合、3次元でモデル化しようとするならば現在のコンピュータ資源をもってしても記憶容量と計算時間に難点がある。また産業界でより広く電磁界解析を設計に利用するためには具体的な応用技術が必要である。

これらの課題を解決するために、2013年に設立された「先進電磁界解析による設計高度化技術調査専門委員会」（五十嵐委員長）において調査検討が行われ多くの技術確立された。

この調査の過程で、これら課題は電磁界解析を産業界で利用するためにさらに調査していく必要があることが認識された。

そこで、「電磁界解析の高精度化技術調査専門委員会」が、2016年4月に設置され、2019年3月までの3年間、電磁界解析の高精度化を調査検討してきた。本技術報告書はこれら調査によって得られた知見をまとめたものであり次のような構成となっている。

第1章では磁性材料に関する技術についてまとめており、1.1節ではヒステリシス特性を考慮した解析技術であり積層された鉄心を均質化法により塊状鉄心としてモデル化を行い数値計算による検証が行われた。1.2節では古典及び異常渦電流損の取り扱いであるが、Bertottiによる異常渦電流損をCauer回路を用いてモデル化を行い検証が行われた。1.3節では磁化特性の応力依存性をマイクロマグネティックスのスケールでのモデリングを行い実測との比較を行っている。1.4節では磁性体が受ける電磁力の計算法では仮想変位法による電磁応力テンソルや磁性体の部分領域に働く電磁力が議論されている。1.5節ではEB対応とEH対応についてまとめられており電磁界のエネルギーと運動量の保存則からの考察が行われている。

第2章ではモデル縮約法についてまとめており、2.1節のモデル縮約法の概要では電磁界解析を現実の問題に適用するためには膨大な計算を必要とするが解析精度を損なわずに小さな方程式に変換し計算負荷を削減する方法である

POD, PVLなどが紹介されている。2.2節はKameari法でありモデル縮約法の一つであり直交基底関数を有限要素法を用いて導出しCauer等価回路表現にもっていく方法であり、CLN法ともよばれる。渦電流場やA法とA-Φ法、開領域、振動問題への適用が議論されている。2.3節は均質化法でありマイクロなスケールを持つ材料のマクロ特性を持つ均質材料で置き換える方法であり、撚り線や圧粉鉄心への応用が述べられている。

第3章は高精度化のための計算手法・並列処理技術についてまとめており、3.1節は空間分割・時間分割併用並列計算、3.2節は階層型領域分割による並列解析であり階層型領域分割法および大規模可視化技術について述べられている。3.3節「京」コンピュータによる大規模電磁界解析では「京」コンピュータを用いた非接触給電システムの解析が具体的に紹介されている。3.4節過去の求解プロセスを利用した誤差修正法による高速化ではn次元連立一次方程式を反復法で解く場合の誤差修正法の手順が説明され解析事例が紹介されている。3.5節有限要素法の高精度化では電磁界における要素の精度が系統的に評価されている。

第4章は最適設計手法の展開についてまとめられており、4.1節表皮深さに着目したIH調理器に使用する鍋寸法の設計例である。4.2節随伴変数法（感度解析）によるトポロジー最適化、4.3節確率的トポロジー最適化は設計領域を細かなセルに分割し、材料情報を確率的に最適化する方法である。4.4節は深層学習を援用したトポロジー最適化である。

本報告書は、これらの調査結果をまとめたものである。

電気学会で発足された電磁界解析に関する調査専門委員会の変遷

| 調査期間            | 調査専門委員会名            |
|-----------------|---------------------|
| 1977年4月～1980年3月 | 有限要素法による電力機器の電磁界解析法 |
| 1980年4月～1984年3月 | 電磁界数値解析法の電力機器への応用   |
| 1984年4月～1987年3月 | 三次元電磁界計算技術          |
| 1987年4月～1990年3月 | 過電流場数値計算技術          |
| 1990年4月～1993年3月 | 三次元電磁界数値計算実用化技術     |
| 1993年4月～1996年3月 | 電磁界解析とその逆・最適化問題への応用 |
| 1996年4月～1999年3月 | 電磁界問題最適化手法の高度化      |
| 1999年4月～2002年3月 | 実用設計のための電磁界数値解析新技術  |
| 2002年4月～2005年3月 | 高速大規模電磁界数値解析技術      |
| 2005年4月～2007年3月 | 実規模電磁界解析のための数値計算技術  |
| 2007年4月～2010年3月 | 電磁界数値解析の有効利用技術      |
| 2010年4月～2013年3月 | 電磁界解析高度利用技術         |
| 2013年4月～2016年3月 | 先進電磁界解析による設計高度化技術   |