

# 主 論 文 要 旨

報 告 番 号	甲 第	号	氏 名	松 本 昌 昭
主論文題名 誘導方程式にベクトル有限要素法を適用した電磁熱流体解析				
内容の要旨 マクスウェル方程式における磁荷不在の法則を自動的に満足するためのベクトル有限要素法は、電磁場解析の分野で発達してきた手法であり、流れ場の影響を考慮した誘導方程式に対する解析に適用された例は、筆者が調べた範囲では見受けられない。従来の解析手法では、流れ場の効果が無視される、反復解析手法であるために計算時間がかかる等の欠点があった。本論文で開発を行ったベクトル有限要素法による誘導方程式の解析手法は、時間進行において反復解析を必要としないにもかかわらず磁束密度が保存されるため、高精度な解析結果を得ることができる解析スキームである。本論文ではこの解析スキームの構築を行い、電磁熱流体解析を行った。以下に本論文の構成および各章における知見を示す。 第 1 章では、本研究における背景、目的および論文の全体構成について述べた。 第 2 章では、マクスウェル方程式および構成方程式から誘導方程式を導き、さらに誘導方程式をベクトル有限要素法で解析を行うための離散化プロセスについて述べた。二つのベクトル形状関数である面ベクトル形状関数と辺ベクトル形状関数の具体的な表現について記述し、それぞれの関数の関係式を明らかにした。誘導方程式をベクトル有限要素法で離散化を行うためには、誘導方程式をファラデーの電磁誘導の法則である磁束密度の時間微分式および修正アンペールの法則とオームの法則から導き出される電場の式の二式に分離し、前式に対しては重み関数として面ベクトル形状関数、後者に対しては重み関数として辺ベクトル形状関数を用いて離散化する必要があることを述べた。誘導方程式に対してベクトル有限要素法を用いた解析手法の検証を行うために、流れ場に GSMAC 法を用いて平行平板間の電磁流体解析を行った。速度場および電磁場の解析結果と理論解析による厳密解との比較を行い、解析結果は良好に一致した。 第 3 章では、2 次元正方形キャビティ内部の電磁熱流体解析を行った。速度場と温度場に対して GSMAC 有限要素法を適用し、電磁場に対してはベクトル有限要素法を用いて離散化した。ハルトマン数の違いによる解析を行い、解析結果は従来の解析手法である B 法と良好に一致した。計算時間に対する計測を行い、B 法による解析結果が本手法と比較して 1.5 倍時間がかかることがわかった。速度場および温度場の計算時間に差はなく、誘導方程式の解析時間が大きく異なり、誘導方程式のみの解析時間を比較すると、計算時間に 4 倍程度の差があることがわかった。この時間差の原因は反復解析手法と陽的解析手法との違いであることを指摘した。 第 4 章では、ベクトル有限要素法を 3 次元誘導方程式に適用した。30 × 30 × 30 の不等分割メッシュを用いてハルトマン数を変化させた解析を実施し、ベクトル有限要素法の 3 次元解析への適応性について調べた。定常状態での速度ベクトル分布、温度分布、磁場分布は B 法と良好に一致し、解析時間は B 法に比較して全計算時間では約 30% の速度向上が得られ、誘導方程式の解析時間のみに着目すると、3 分の 1 で済むことがわかり、本手法の優位性が明らかとなった。以上により、第 2 章および第 3 章で検証された手法は 3 次元解析においても有効であることがわかった。 第 5 章では、8 : 1 形状の長方形キャビティ内の電磁熱流体解析を行った。まず、磁場を考慮しない系に対して速度場の解析手法に GSMAC 有限要素法、エネルギー方程式の解析手法に CIP 有限要素法を適用し、 $3.4 \times 10^5$ の高レイリー数における定常振動状態に対する自然対流解析を行った。メッシュ依存性について詳細に調べ、等間隔メッシュを用いて解析を行う場合には、40 × 200 以上のメッシュが必要であることを示した。レイリー数を変化させたパラメータスタディを行い、壁面ヌッセルト数とレイリー数の関係を調べ、理論値である 4 分の 1 乗に比例した結果が得られた。また、臨界レイリー数が約 $2.9 \times 10^5$ であると推定した。磁場を印加した解析を実施し、ハルトマン数の流れ場および電磁場に与える影響を調べた。ローレンツ力の影響は流れ場および温度場に顕著に作用し、磁場を印加していない場合には定常振動流であった流れ場が磁場を印加することで定常流に変化したことがわかった。さらに、電磁場は流れ場の影響を受け、同時に流れ場は電磁場の影響を受け、流速が大きく変化する領域で磁束密度が大きく変化し、逆に電磁場の作用が大きくなると流れが安定化する相互作用を確認できた。 第 6 章は、本論文のまとめであり、今後の展望や課題について述べた。				