

## 論文の内容の要旨

氏名： 西 原 淳 夫

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：電子機器における熱現象のモデル化に関する研究

地球温暖化をはじめとする環境問題がクローズアップされている。気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の発表した第5次評価報告書によれば、地球温暖化に関して1880年から2012年の間に陸域と海上を合わせた世界平均気温が $0.85^{\circ}\text{C}$  上昇したことが確認された。また、その主な原因は人為的な温室効果ガスの排出によって大気中の温室効果ガス濃度が高まっていることであり、代表的な温室効果ガスである二酸化炭素の濃度は1750年における278ppmから2011年には390.5ppmに増加していることが指摘されている。この状況に対して、気候変動枠組条約では1997年に京都議定書を採択し、先進国における温室効果ガスの排出量削減目標を定めた。また、気候変動枠組条約締約国会議では、途上国も含めた新たな枠組みに関する議論が継続している。したがって、電機製品の研究開発に際しても温室効果ガスの排出量削減は重要な課題となっており、製品のさらなる省エネ化、高効率化が望まれる。

一方、中国をはじめとする新興国での製造業の発展に伴って、電機製品のビジネス上の競争が激化している。2014年の世界家電市場(主要白物家電および小物家電35品目)においては生産量ベースでの中国のシェアは81.1%に達しており、日本メーカは劣勢に立たされている。逆に、重電・インフラの分野では欧米メーカが世界市場を握っており、日本メーカは追いかける形で技術開発を進めている。このように分野によって立場は異なるものの、グローバル化の進展に伴って企業間の競争が激化しており、電機製品には、性能の向上と一層の製造コスト削減が求められている。

以上に述べたように、電機製品の研究開発に際しては、環境への負荷低減、性能の向上と製造コストの削減という互いに相反する課題が存在する。そこで、競争力のある製品を国際市場に供給していくためには、それらの課題を高い次元でバランスさせていく必要がある。

例えば、電気自動車(EV)、ハイブリッド車(HV)に代表されるようなパワーエレクトロニクス応用製品によってエネルギー効率の向上を実現し、エネルギー消費量を抑えることによって環境負荷の低減を図ることができる。しかし、電動化のためにはモータ、電池、インバータ等の部品コストが発生してしまう。その際、パワー半導体の冷却技術を高度化し、半導体チップのサイズや個数を低減することによって、より高い次元での製品仕様のバランスを実現し、製品の競争力の向上に貢献できる。

また、電気機器の冷却技術として固体伝導冷却、自然空冷、強制空冷、液冷等の方式が候補に挙げられる。このとき例えば、強制空冷を用いれば自然空冷よりも冷却能力を高くできる代わりに、ファンを用いるため、部品とメンテナンスのコストが増加してしまう。このように各冷却方式にはメリットとデメリットがあるので、それぞれの冷却方式について限界を高めていくことが求められる。

以上述べたように、伝熱・冷却技術を高度化することによって電機製品の開発課題解決に貢献できる場面が数多く存在する。この伝熱冷却技術の高度化において、解析シミュレーション技術により各種製品の冷却特性を事前に把握することができると信頼性や製造コストの大幅な低減に寄与することができるものと考えられる。

電機製品の冷却に関する研究開発に際しては、以前よりコンピュータシミュレーションが利用されてきたが、昨今の計算機ハードウェアとソフトウェアの進歩によってシミュレーション技術はより身近なものになってきた。

計算機ハードウェアの処理速度と記憶容量の進歩は目覚ましい。世界で最も高速なコンピュータシステムをランキングしているTOP500サイトのデータによれば、過去20年間にスーパーコンピュータの性能は10万倍以上に加速した。また、パーソナルコンピュータ(PC)の処理能力も並行して進歩しており、現代のPCの能力はかつてのスーパーコンピュータを凌駕するものである。

一方、熱流体の解析ソフトウェア技術も進歩しており、現在では設計者が市販のソフトウェアを用いてPC上でシミュレーションを実施することもよく行われている。したがって、一般的な対象を取り扱う熱

流体シミュレーションを実施するためにソフトウェアを自作する必然性はなくなったといえる。

しかし、先端的な製品の研究開発の現場では、それまで扱われて来なかった課題が発生する場合があります。汎用のシミュレーションソフトウェアでは計算コストを考えると設計に適用することが難しい場面が生じる。そのような新しい課題に対応して、その都度、解析技術を開発し、新しいソフトウェアを作成して対応していくことが求められている。本論文ではこのような従来の汎用的なソフトウェアでは対応が難しい各種の電子機器における熱現象に対して、新しい物理モデルを用いて計算負荷の低減を図り、実際の機器を対象とした最適設計が可能となるような新しい解析手法について検討した。

本論文は全7章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究を行う上での、研究の背景、研究の目的と特徴、本論文の構成、および従来の研究について述べた。

第2章では電子機器における熱現象に対して解析的にアプローチするために、本論文で採った方法について述べた。

第3章では自動車用パワー半導体冷却用の水冷ピンフィンヒートシンクの形状パラメータサーベイと性能予測モデルについて述べた。コンパクトで高性能の水冷ヒートシンクとしてピンフィンがよく用いられるが、平板フィンと比較すると特に比較的短いピンフィンについては性能予測式のようなデータが少ないのが現状である。そこで、ピンフィンの形状を変えた多数の実測を行って、性能予測モデルを構築した。

第4章では自動車用パワー半導体冷却用の水冷ピンフィンヒートシンクの最適設計について述べた。第3章で取得した実測データと、熱伝達と圧力損失に関する予測式に基づいて、遺伝アルゴリズムを用いた最適化による新たな設計手法を提案した。

第5章では、鉄道車両用電力変換装置の自然空冷について述べた。鉄道車両では架線より流れ込んだ電流を駆動用の主電動機と空調や照明等の補機に向けて、電力変換装置によって電圧と周波数を調整した上で供給している。また、保守の手間を省くため、国内では電力変換装置の冷却はファンレスとすることがほとんどである。したがって、補機用の電力変換装置は車両が停車中も電力を供給する必要があるため、走行に伴う風が当たらない自然空冷の状態でも冷却可能な設計とする必要がある。本論文では熱伝達のマクロモデルに基づく自然空冷のヒートシンクの設計手法を開発し、それを用いた設計例を示した。

第6章では極低温機器の電磁・熱連成解析手法について述べた。超電導磁石は強力な磁場を発生できるため、MRI (Magnetic Resonance Imaging) 装置向けに実用化されている。しかし、超電導の線材によってコイルを作成することは高度な技術力を要するため、従来の超電導磁石は大型で高価なものであった。一方、高温超電導体の固まり(バルク体)を別の磁石で着磁することによって得られる超電導バルク磁石はコンパクトで比較的安価な超強力磁石として期待されている。本論文では、超電導バルク磁石の応用のために誘導電流の取り扱いを工夫することにより効率的な解析が可能な着磁現象のシミュレーション技術を提案し、伝熱との連成解析を含む将来への展望について述べた。

第7章は結論であり、本研究の成果を総括した。

以上のように、先端的な製品の研究開発の現場で発生する、従来の汎用的な解析ソフトウェアでは対応できない新しい課題に対応するため、開発してきた解析技術とソフトウェアについて説明した。

本論文「電子機器における熱現象のモデル化に関する研究」ではこのような各種の電子機器における熱現象に対する新しい解析手法について検討した結果、解析技術の開発を通じて物理現象への理解を深め、研究開発と製品設計に貢献できることを示した。