



リアクトル開発における 電磁気／熱設計技術

神頭卓司*・山本伸一郎・加藤雅幸
結石友宏・澤井孝典

Electromagnetic and Thermal Design Technology for Reactor Development — by Takuji Kantou, Shinichiro Yamamoto, Masayuki Katou, Tomohiro Keishi and Takanori Sawai — Recently, global warming has become a serious social problem. As an environmental measure, the automotive industry has been putting their efforts into the development of environmentally-friendly automobiles such as the hybrid electric vehicle (HEV), plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), electric vehicle (EV) and fuel cell vehicle (FCV). To be popularized, these eco-friendly vehicles should have high energy efficiency, as well as powerful acceleration equivalent to gasoline-fueled vehicle quality; therefore, they require a high-power motor (higher voltage output). Consequently, a boost converter is needed to increase the battery voltage for a high outputting motor. A converter is also necessary to recharge the battery for the EV and PHEV from a household outlet. As the boost converter expands in application to various fields, in order to reduce its size and cost, automakers are working to increase the drive frequency. At Sumitomo Electric Industries, we are working to develop low-cost and compact reactors, one of the core components of the converter. Computer Aided Engineering (CAE) environments for electromagnetic and thermal design, the foundations of reactor development, were constructed to perform detailed design. With our original tool, we have been able to increase consistency with measured values. This paper reports the contents of our development.

Keywords: reactor, electromagnetic design, thermal design, eco-friendly vehicle

1. 緒言

近年、地球温暖化が大きな社会問題となり、環境対策の観点から各自動車メーカはハイブリッド自動車 (HEV) やプラグインハイブリッド自動車 (PHEV)、電気自動車 (EV)、燃料電池車 (FCV) 等の環境に優しい車の開発に取り組んでいる。環境対策車を普及させるためには、単なる燃費対策だけでなく、ガソリン車並の走行性能、加速性能が必要であり、モータの高出力化 (高電圧化) が進められている。そのためには、バッテリー電圧を高めるための昇圧コンバータが必要となる。また、EVやPHEVにおいては家庭用電源からバッテリーへの給電にもコンバータが必要となる。このように多岐に渡りコンバータの用途は増えつつあり、更に小型、低コスト化のために駆動周波数を高める開発が自動車メーカを中心に進められている。当社では、コンバータの中の基幹部品であるリアクトル^{*1}を開発しており、低コスト且つ小型化に向けた取り組みを行っている。その開発の基礎となる電磁気、熱設計に対し、詳細な設計を行うためのCAE^{*2}環境を構築し、実測との整合性を高めると共に、開発期間を短縮する独自ツールを開発した。本稿ではその内容を報告する。

2. リアクトルの構成

HEV、PHEV、EV等のシステムにおいて電圧変換に必要なコンバータの適用箇所を図1に示す。一例として、

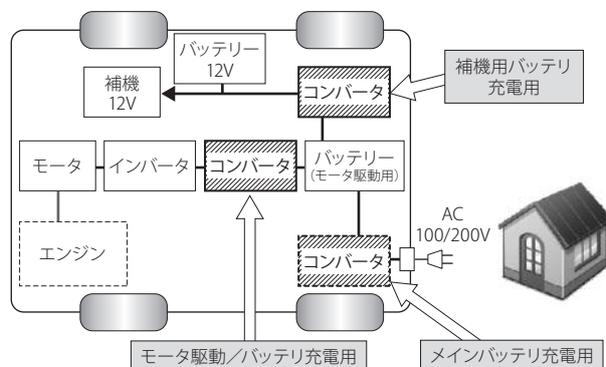


図1 HEV, PHEV, EVシステム

昇圧コンバータの内部構成を図2に示す。リアクトル、パワー半導体、コンデンサ、及びこれらを駆動する回路から構成されている。リアクトルは写真1のように鉄心に絶縁した銅線をコイル状に巻いたものであり、このコイルに電流を流すことでエネルギーの蓄積/放出を交互に行い電圧を変換する基幹部品である。

当社で開発を行っているリアクトルの仕様は表1の通りである。

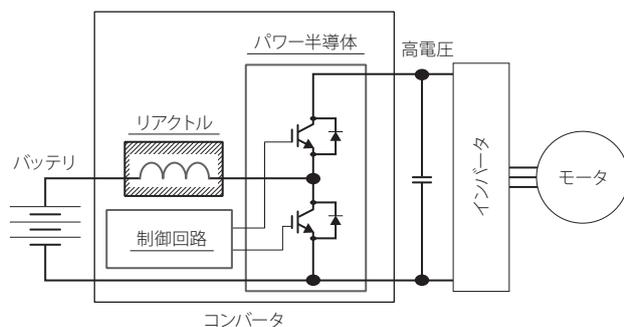


図2 コンバータの例

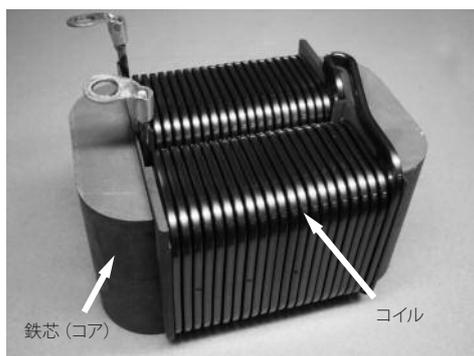


写真1 当社開発リアクトルの外観

表1 当社開発リアクトル適用範囲

インダクタンス	～500μH
入力電流	～200A
周波数	～100kHz

3. 設 計

リアクトルを設計する上で、最も重要な要素は、①電圧変換に必要なパラメータとなるインダクタンス^{※3}、②燃費に影響する損失である。インダクタンスは正確に実測する手段があるが、損失についてはリアクトルの力率が低いこと電流と電圧の位相誤差が大きくなることから正確な値を実測することが難しい。損失測定のための代替手段として、リアクトル通電時に損失は熱に変換することから、リアクトル温度の設計値、測定値の整合性を確認することで損失設計値の妥当性を確認する。

リアクトルを設計するためのフローを図3に示す。大きく電磁気設計と熱設計に分かれる。

電磁気設計では基本設計と詳細設計の2段階に分けてインダクタンスやサイズを求める。特長は、基本設計時に当社開発ツールを用いて概略サイズをもとめることで設計期

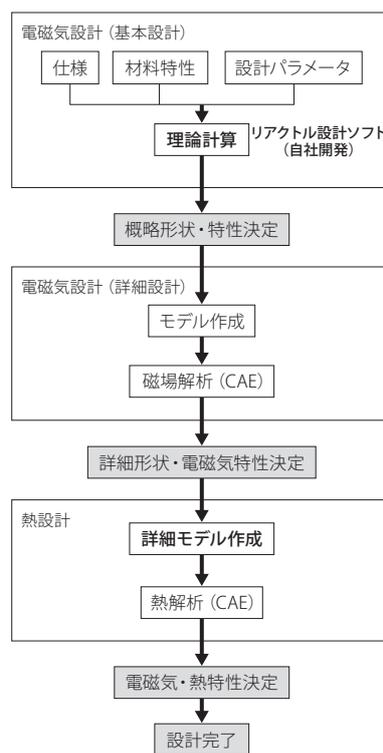


図3 リアクトル設計フロー

間を短縮できることである。

熱設計での特長は、構造に対して忠実にモデル作成を行うことで±10%以内の精度でリアクトル温度を予測できることである。その温度をもとに、耐熱性を考慮した部品を選定し、最終的な構造やサイズを決定する。

これらの解析結果は最終的には実測にて設計の妥当性を確認する必要がある。

以上のフローで設計を行うことで、短期間で高精度な電磁気設計、熱設計ができるようになり、1回目の試作において仕様を満たすリアクトルの作製が可能となった。その詳細を以下に説明する。

3-1 電磁気基本設計 電磁気基本設計では要求仕様(インダクタンス、損失、サイズ)を満足するリアクトルの概略構造を短期間で決定できるツールの開発を目指した。これによって詳細設計を繰り返す必要がなくなり、全体的に設計期間を短縮することができる。

ツール開発にあたり、インダクタンスの算出には電磁気理論に基づいた代表的な式(1)、(2)を使用した。

損失については、図4の通りに分類される。この中の交流抵抗損については単純な計算では求めることができない為、詳細設計(磁場解析)にて求める。コイルの直流抵抗損失は一般理論式(3)、(4)を使用して算出した。

$$B_{\max} = \frac{LI_{\max}}{NS} \dots\dots\dots (1)$$

$$L = N^2 \left(\frac{l_c}{\mu_r \mu_0 S} + \frac{l_g}{\mu_0 S} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

B_{max} : 最大磁束密度 l_c : コア磁路長
 L : インダクタンス l_g : 総ギャップ長
 I_{max} : 最大電流 μ_0 : 真空透磁率^{*4}
 N : コイル巻数 μ_r : コアの比透磁率^{*5}
 S : コア断面積

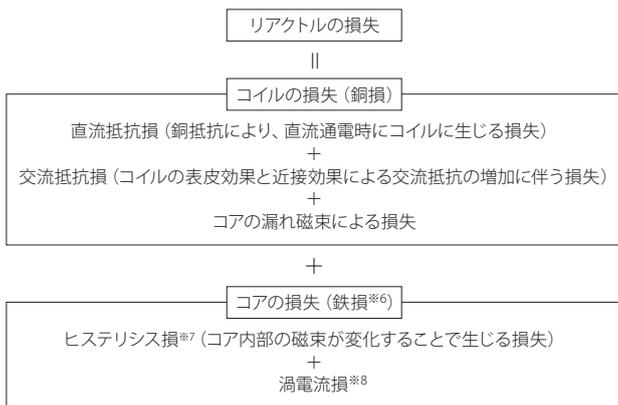


図4 リアクトル損失内訳

$$R_{dc} = \rho_0 \frac{l}{S} \{1 + \alpha_0 (T - 20)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

R_{dc} : 直流抵抗 T : 温度
 ρ_0 : 体積抵抗率 (20℃の時) S : コイル断面積
 l : コイル長さ α_0 : 抵抗温度係数

$$P_{coil} = I^2 R_{dc} \quad \dots\dots\dots (4)$$

P_{coil} : コイル損失 I : 電流

また、コアの損失はスタインメッツの式 (5) を使用して算出した。

$$P_{core} = K_h B_m^{1.6-2} + K_e B_m^2 f^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

P_{core} : 鉄損 B_m : 最大磁束密度
 K_h : ヒステリシス損係数 f : 周波数
 K_e : 渦電流損係数

式 (5) に必要となるコアの物性値 (ヒステリシス損係数と渦電流損係数と最大磁束密度) は材料によって異なる。一般的にリアクトルのコア材料は、電磁鋼板、フェライト、アモルファス等であるが、本稿では当社独自の圧粉磁心^{*9}

(純鉄やFe-Si系などの粉に絶縁被膜処理して加圧成形)、及びコイル線材を用いて検討した結果について述べる。これらの主要材料において把握している詳細な物性値を活用することで設計の精度を高めた。

また、従来の設計においては設計パラメータを何度も変更して最適解を求めており、非常に時間を要していた。そこで、設計パラメータを規定された範囲内で全組み合わせについて自動的に算出し、最適なりアクトル構造を探索するソフトウェアを独自に開発した。このことにより、基本設計期間を従来に比べて大幅に短縮することができるようになった。

3-2 電磁気詳細設計 電磁気基本設計で決定した概略サイズに対して、次のステップとして、インダクタンス、損失 (交流抵抗損、鉄損) の詳細を算出すべく、電磁気詳細設計を行う。

そのためには、①磁束がコア内部を流れる疎密の詳細をCAE解析にて分析し (図5)、②ギャップ部の漏れ磁束による影響 (図6) を分析し、③予め実測した圧粉磁心の非線形な磁気特性 (図7) を反映することで、インダクタンス直流重畳特性の精度を上げた。

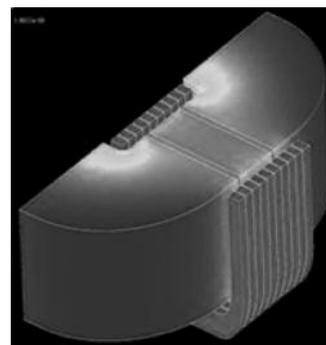


図5 磁場解析コンター図 (磁束密度分布カットモデル)

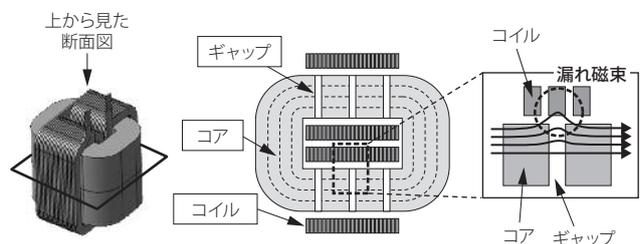


図6 ギャップ部の漏れ磁束

図8は磁場解析ソフト (CAE) で以上の内容を含めて計算した磁束密度のコンター図であり、図6で示したギャップ部の漏れ磁束を予測することができる。

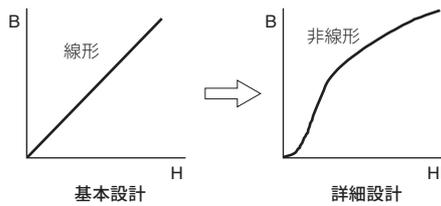


図7 磁気特性の非線形性

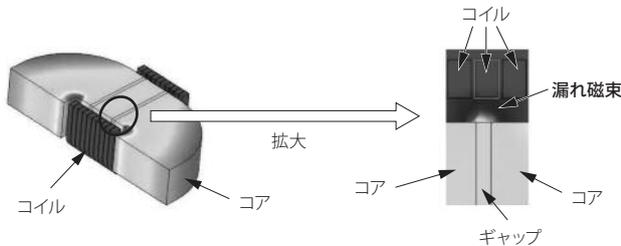


図8 磁場解析カウンター図 (磁束密度分布カットモデル)

磁場解析より求めた磁気エネルギーと電流値から詳細なインダクタンス重畳特性を式 (6) により計算できる。

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

E : 磁気エネルギー L : インダクタンス I : 電流

一方、損失は磁場解析にてそれぞれ算出する。直流抵抗損はコイルに流れる電流分布から算出した。交流抵抗損は表皮効果、近接効果、漏れ磁束による電流分布から算出した。鉄損はコアの磁束密度の分布毎にスタインメッツの式 (5) を用いて算出した。

以上により詳細に求めた損失値を熱設計の発熱条件として反映させた。

3-3 熱設計 熱設計では損失値の妥当性を確認することに加え、各部品の耐熱温度に対し余裕のある設計となっているかを確認する必要がある。

電磁気詳細設計で算出したデータを元に周辺部品 (ケース等) まで含めて熱解析用モデル (図9) を作成した。ここで当社の特長は、構造に対して忠実にモデルを作成することである。例として、コイルの芯線と被覆を別々のモデルとして作成することや、コア-ケース間の接触熱抵抗^{※10}や、ギャップ-コア間の接着剤等の放熱に影響する箇所の詳細モデル化が挙げられる。これらのモデル化により過渡特性の精度向上へ繋げることができた。

各部品の熱特性に関する物性値は基本となる熱伝導率に加え、時間による温度変化を検証するため比熱や密度についてもパラメータとして入力した。これらのパラメータの

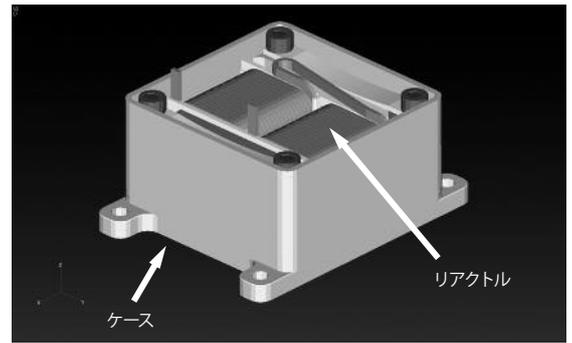


図9 熱解析 (CAE) 用モデル外観

精度を高めるため、個々の部品について実測で物性値を確認し、モデルに反映した。

更にリアクトルの発熱要素として図10~12のように電磁気詳細設計にて算出した直流抵抗損 (図10: 銅抵抗の温度依存性を考慮し関数でコイル全体に設定)、交流抵抗損 (図11: 表皮効果と近接効果と漏れ磁束の影響をコイル内側表面に設定)、鉄損 (図12: ヒステリシス損と渦電流損をコア全体に設定) の詳細値をモデルに与えることで熱解析の精度を高めた。

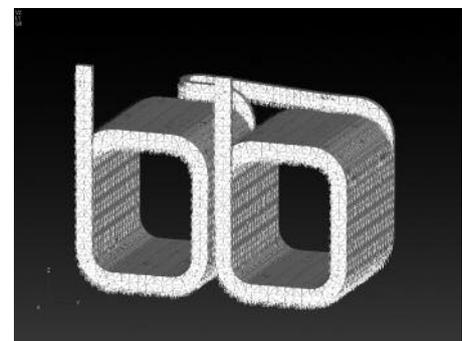


図10 発熱要素設定 (直流抵抗損)

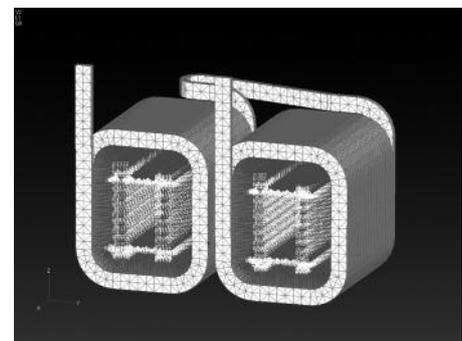


図11 発熱要素設定 (交流抵抗損)

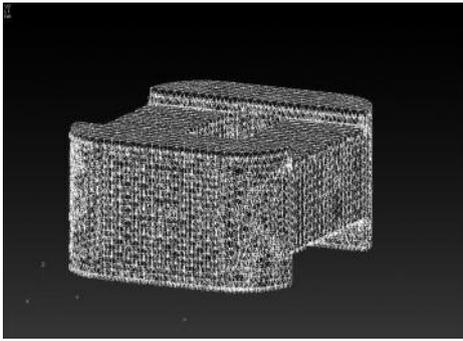


図12 発熱要素設定 (鉄損)

以上の詳細条件にて熱解析を実施した結果を図13に示す。コイル上面の温度が高い結果となる事が分かる。更に図13の白線部で断面カットした結果が図14であり、矢印の箇所(コイル上面の中央エリア)が最高温度である事が分かった。これらの結果から、各部材の耐熱温度と比較し、温度に余裕をもつ構造を選択することが可能となった。

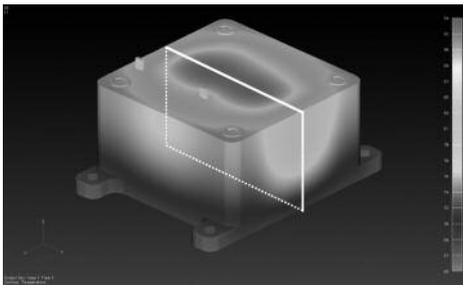


図13 熱解析コンター図

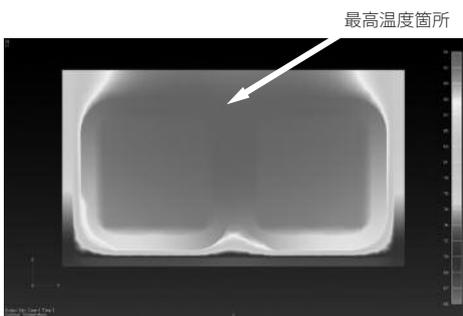


図14 熱解析コンター図 (断面カット)

4. 評価

以上の設計結果の妥当性を検証すべく、リアクトルを製造し、インダクタンスの設計値と実測値の比較を行った。

最小電流から最大電流まで5通りの電流条件で、設計値と実測値を比較したところ、いずれも $\pm 10\%$ 以内に収めることができた。

更に熱設計結果における検証は通電条件2種類について行った。①リアクトルへ高負荷条件で通電開始してから時間経過とともに温度が上昇する過渡のモードと、②通電状態で温度が一定になったときのモードにて、図15に示す6ヶ所の測定箇所にて設計値と比較した結果、それぞれにおいて $\pm 10\%$ 以内に収めることができ、電磁気、熱共に高精度で設計でき、設計ツールの能力を確認した。

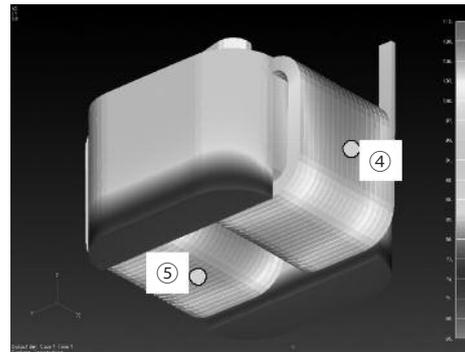
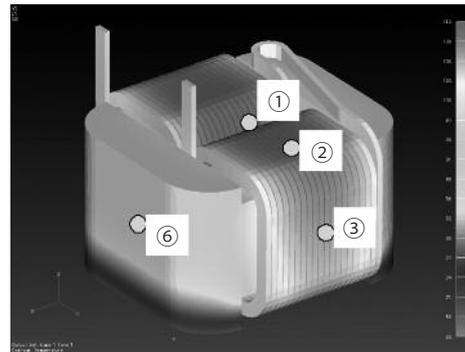


図15 測定箇所

5. 結 言

リアクトルの電磁気/熱設計に対して、理論式による基本設計からCAEによる詳細な設計に至るまでの独自ツールを開発した。更にインダクタンスや温度上昇の過渡現象についても実測結果と精度良く一致することを検証できた。これらの成果は、リアクトル開発における有効な設計ツールとして製品開発に役立つものと期待している。

用語集

※1 リアクトル

エネルギーの蓄積／放出を交互に行うために巻線を利用した受動素子

※2 CAE

Computer Aided Engineeringの略。設計した構造が要求性能を満たすかどうかをコンピュータ上でシミュレーションして調べること。

※3 インダクタンス

回路の電流の変化に対する誘導起電力の比を表す定数

※4 真空透磁率

真空中の磁束密度 B と磁界 H との関係を「 $B=\mu_0 H$ 」で表したときの μ_0

※5 比透磁率

真空の透磁率 μ_0 に対する比 μ/μ_0

※6 鉄損

磁性材料の鉄心（コア）にコイルを巻き、交流で磁化した時に失われる電気エネルギー

※7 ヒステリシス損

鉄心に交流磁界が印加される時に、鉄心の磁区が交番磁界によって磁界の向きを変えるときに生じる損失

※8 渦電流損

鉄心に交流磁界が印加される時に、鉄心の中に生じる渦電流によって生じる損失（高周波になるほど渦電流損の比率が大きくなる。）

※9 圧粉磁心

絶縁被膜を施した軟磁性粉末を加圧成形して得られる素材

※10 接触熱抵抗

固体同士の接触面が完全に密着しないことにより生じる熱抵抗

参考文献

- (1) 「定本トイダル・コア活用百科」、山村英穂
 - (2) 「エレクトロニクスのための熱設計完全入門」、国峰尚樹
 - (3) 「電子機器・部品用放熱材料の高熱伝導化および熱伝導性の測定・評価技術」、技術情報協会
-

執筆者

神頭 卓司*：自動車技術研究所 主査
モータ駆動の環境対策車に搭載される
リアクトルの開発・設計に従事



山本伸一郎：自動車技術研究所
加藤 雅幸：自動車技術研究所 主席
結石 友宏：解析技術研究センター グループ長
シニアスペシャリスト 工学博士
澤井 孝典：自動車技術研究所 所長

*主執筆者