

機電一体型・電動ポンプの熱シミュレーションのモデル開発と運用

青山 泰崇
Yasutaka Aoyama

平塚 裕太
Yuta Hiratsuka

服部 修二
Shuji Hattori

概要

電動ポンプは、ECU・モータ・ポンプで構成されるが、この3つの部位で発熱と放熱が発生し、複雑な熱の流れをする。さらに、ECUの設計では、小型の電子部品を採用するなど小型化を進めており、背反となる熱について、シミュレーションが求められている。今回は、機電一体型のECUの熱設計を目的に、そのデジタルツールとなる熱シミュレーションのモデル開発と運用の紹介をする。

1. はじめに

自動車への搭載をコンパクトにするため、自動車部品は機電一体型の製品が増えている。電動ウォーターポンプ（以降、EWPと略称する）は、その1つである。EWPは、メカ式ウォーターポンプを電動化したもので、従来はベルトで回されていたウォーターポンプを電動化し、車両で必要な時に必要な流量の冷却水をポンプで供給する働きをする。電気で動かすために、制御ユニットである、ECUが必要になる。EWPは、ECU部・モータ部・ポンプ部で構成されるが、この3つの部位で図1に示す複雑な熱の流れをする。

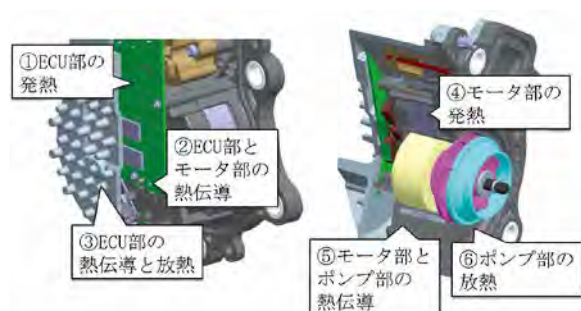


図1 EWPの熱の流れ

- ①ECU部では、電子部品が発熱する。
- ②ECU部とモータ部は、バスバーで熱伝導による熱のやりとりをする。
- ③ECU部は熱伝導シートを介して、アルミ筐体から空気に対流と輻射によって熱のやりとりをする。
- ④モータ部は、コイルの銅損とコアの鉄損で発熱する。
- ⑤モータ部とポンプ部は、樹脂筐体で熱伝導による熱のやりとりをする。

⑥ポンプ部は、冷却水を吐出し熱輸送する。

これら複雑な熱の流れに加え、車両ごとの仕様で雰囲気と冷却水の温度条件が変わり、熱の流れがひっくり返ることがある。そのため、製品開発の初期段階の熱設計で、ECUの電子部品の温度を見積もるのが難しい。また、製品設計では常に、小型・低コスト・機能向上を図っており、熱設計が年々厳しくなっている。小型では、ECU製品は開発の世代が進むごとに、小型の電子部品を採用し小型化の設計を行い、表面積が低下する。低コストでは、従来はアルミを使っていたところを、樹脂に変更しコスト低減をする設計で、熱伝導率が低下する。機能向上では、機能の追加や出力アップをする設計で、発熱量が上昇する。表面積の低下・熱伝導率の低下・発熱量の上昇を、式(1)から(4)に当てはめると、温度上昇が大きくなる¹⁾。

$$\text{伝導の熱抵抗} = \text{長さ} / (\text{面積} \times \text{熱伝導率}) \quad (1)$$

$$\text{対流の熱抵抗} = 1 / (\text{表面積} \times \text{熱伝達率}) \quad (2)$$

$$\text{輻射の熱抵抗} = 1 / (\text{表面積} \times \text{輻射の熱伝達率}) \quad (3)$$

$$\text{温度上昇} = \text{熱抵抗} \times \text{発熱量} \quad (4)$$

機電一体型ECUでは、熱の流れが複雑で電子部品の温度の見積もりが難しいこと、ECUの熱設計が年々厳しくなっていることから、今回、熱シミュレーションの技術開発に取り組んだ。

2. 熱シミュレーションのモデル開発

熱シミュレーションの技術開発の目標値として、温度精度は実機の温度上昇に対して20%以内、計算時間は15時間以内と2つの観点で、製品開発で使える実用的な数値で目標設定をした。シミュレーション・ソフトは

Simcenter Flothermを使用した.モデル構築は,電子部品のモデリングから始め,次に基板をモデリングし,ECUのモデルを完成させ精度検証を行う.次に,メカをモデリングし,ECUのモデルを組み込み,機電一体のモデルを完成させ精度検証を行う.

2.1 ECUのモデリング

電子部品のモデリングを始めるにあたり,まずは選別を行う.選別とは,図2に示すように,選別前は80個ほどの電子部品から,選別後は12個にモデリングする電子部品を絞る作業である.絞ることで,モデルの規模を抑え,技術開発の目標値の観点の1つである計算時間を短縮する.一方で,もう1つの観点である温度精度を低下させないため,温度に寄与する電子部品は絞らないよう適切に選別する.EWPの熱シミュレーションでは,発熱量・表面積・熱流束・温度上昇のクライテリアの,4つの条件で選別した.選別の結果,モデリングする電子部品は,インダクタ・シャント抵抗・制御IC・FET・コンデンサの5種類となった.

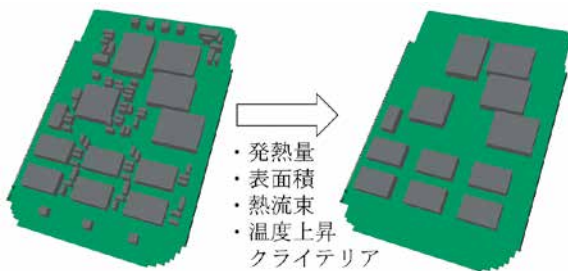


図2 電子部品の選別

ここから電子部品のモデリングを始めるが,我々は電子部品を作るデバイスメーカーでなく,購入し使わせて頂くセットメーカーである.一般的に,熱シミュレーションのモデリングは,形状のCADを用意し熱の物性値を設定する方法を用いる.しかし,セットメーカーでは,電子部品の内部形状まで含めた詳細なCADや物性値の情報を入手するのが難しい.セットメーカーの立場で電子部品をどのようにモデリングしているか,コンデンサを事例に説明する.

コンデンサは2つの実験で熱特性を同定してモデリングする.1つ目の実験では,輻射率を決める.実物のサンプルを入手し,図3に示すようにコンデンサの天面の一部に黒体テープを貼り,ヒーターを使ってコンデンサを温める.加熱後,サーモビューアを使って,輻射率を黒体テープの輻射率に設定し,コンデンサの天面の黒体テープの温度を測定する.次に,黒体テープを貼っていない天面の温度を測定し,同じ温度になる輻射率を探す.このとき,同じ温度になった輻射率を,コンデンサの輻射率として決定する.2つ目の実験では,熱伝導率を決める.1つ目の実験と同様に,ヒーターでコンデンサを温

め,熱電対を使って天面とリード部の温度を測定する.この実験の状態を,熱シミュレーションのモデルで再現する.コンデンサは形状を円筒でモデリングし,熱伝導率はパラメータスタディで数値を振る.パラメータスタディでは,実験で測定した天面とリード部の温度を再現する熱伝導率を探索する.このとき見つかった数値をコンデンサの熱伝導率として決定し,コンデンサのモデルが完成となる.

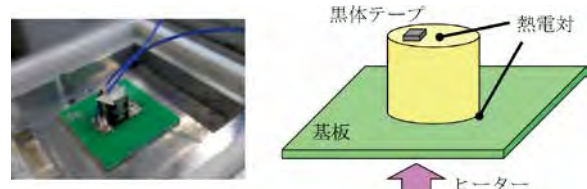


図3 コンデンサの熱特性の実験

電子部品のモデルが完成したら,発熱量を設定する.発熱量は,各電子部品の電圧と電流の波形を実機で取得し計算する.熱シミュレーションの技術開発の段階では,発熱量の誤差を小さくするため,実機の波形から計算するが,技術開発後の運用の段階では,回路シミュレーションやエクセルの設計計算で発熱量を計算する.

基板のモデリングは,配線パターン形状のモデリングと,配線パターンを流れる電流のジュール発熱の計算を行う.配線パターン形状は,シミュレーションソフトの機能を使い,基板CADから配線パターンを読み込み,基板全体を格子状に領域分割し,1つ1つの領域の銅箔の存在率に応じた等価熱伝導率でモデリングする.EWPで領域の分割数を検討した結果を図4に示す.グラフの横軸が領域の分割数,縦軸の左側の青色の棒グラフが計算時間,縦軸の右側のオレンジ色の棒グラフが温度精度を示す.熱シミュレーションの技術開発の観点の1つである温度精度としては50分割で十分と考えたが,もう1つの観点の計算時間に大きな影響が無く100分割を使うことにした.

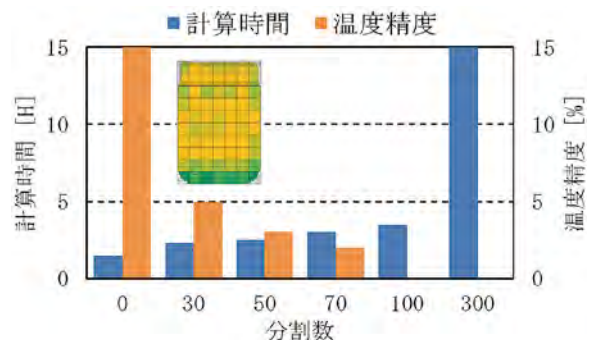


図4 基板の分割数

配線パターンを流れる電流のジュール発熱は,EWPの場合,電子部品の発熱量と比べて無視できない大きさのため,発熱量を計算して設定する.ジュール発熱を設定しない場合と設定する場合で,シミュレーション結果

の温度精度に4%の差が生じた。他に、実機の測定結果と比較する場合は、ハーネスなどの測定環境や熱電対をモデリングして、ECUのモデルが完成する。

2.2 メカのモデリング

メカ部品をモデリングし、完成したECUのモデルを組み込み、機電一体のモデルを作成する。メカ部品は情報が入手できるため、形状のCADを用意し熱の物性値を設定するという、一般的な熱シミュレーションのモデリング方法を用いる。モデリングでは、技術開発の目標である温度精度と計算時間が両立するように工夫する。例えば、モータ部のステータコアの積層鋼板は、設計のCADを使うと積層の1枚ごとにCAEでメッシュを作成する事になり、メッシュ数が多くなり計算時間が増加する。そこで、形状のCADを積層から一体に変更して、メッシュ数を削減し計算時間を低減する。一方で、積層から一体にすると、積層方向の熱伝導の再現性が悪化するので、一体の熱伝導率に異方性を持たせることで再現性を向上する。積層鋼板と絶縁層のそれぞれの厚みと熱伝導率を使って、一体の等価熱伝導率を計算すると、平面方向は、ほぼ積層鋼板の熱伝導率、積層方向は1~5[W/mK]程度になる。他にも、温度に影響しないメカ部品は省略するなど、温度精度と計算時間が両立するモデリングを行う。

ポンプ部の冷却水のモデリングは、流体解析を使って冷却水の熱伝達を求め、モデルに反映する。流体解析で得られた、ポンプ部の各面の熱伝達係数から熱抵抗を算出した結果を図5に示す。今回のEWPでは、モータの発熱量を考えると温度上昇が微小と分かったため、冷却水は各面を温度固定することでモデリングする。

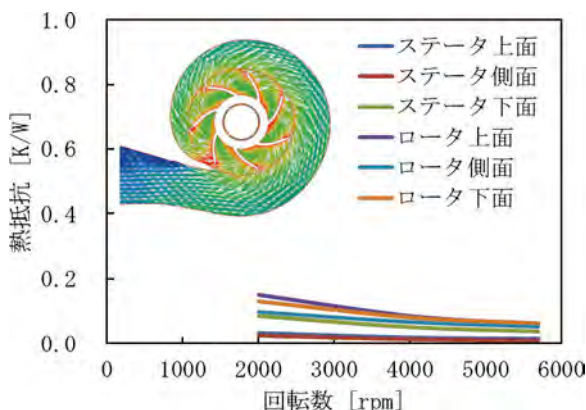


図5 ポンプの冷却水の熱抵抗

メカ部品のモデルが完成したら、発熱量を設定する。発熱量は、モータ部のコイルの銅損とステータコアの鉄損の2つを計算し設定する。コイルの銅損は、抵抗値の温度特性を考慮して電流波形から RI^2 で計算し、ステータコアの鉄損は、磁界解析でシミュレーション計算する。完成したメカのモデルに、ECUのモデルを組み込

み、機電一体のモデルが完成する。

2.3 モデルの精度検証

完成したECUと機電一体のモデルの精度検証をする。熱シミュレーションの技術開発の目標値として、温度精度は実機の温度上昇に対して20%以内を設定しているが、温度上昇は式(5)に基づき熱抵抗と発熱量の掛け算となり、この2つの精度に左右されるため、精度検証は、熱抵抗・発熱量・温度上昇の3つの観点で実施するのが良い²⁾。

$$\text{温度上昇} = \text{熱抵抗} \times \text{発熱量} \quad (5)$$

ここでは、機電一体の温度上昇の精度検証の結果のみを図6に示す。グラフの横軸が温度測定した電子部品とメカ部品、縦軸の左側が温度上昇で、青色の棒グラフが実機の測定結果、赤色の棒グラフがモデルのシミュレーション結果、縦軸の右側のオレンジ色の棒グラフが誤差を絶対値で示す。

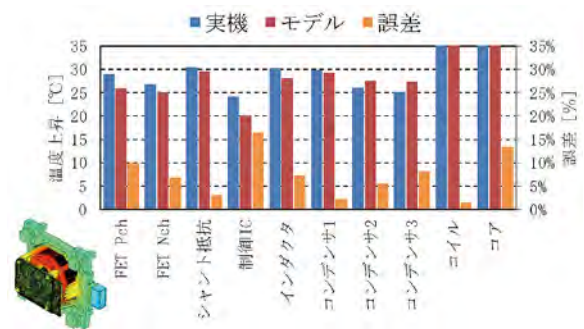


図6 機電一体の温度上昇の精度検証

機電一体の熱シミュレーションで、温度精度は実機の温度上昇に対して16%、計算時間は12時間となり、目標値である温度精度の20%以内と計算時間の15時間以内を満足し、技術開発が完了した。

3. 熱シミュレーションの運用

今回、技術開発した熱シミュレーションを、製品設計に技術運用した成績を示す。1年間の技術運用で、機種×条件×部品数の総数で178個の電子部品の温度上昇を熱シミュレーションで予測し、実機の温度上昇と比較した結果を図7に示す。青色の点が1つ1つのデータ、オレンジ色の線3つのうち中心の実線が実機とシミュレーションの温度上昇が一致、両側の点線が温度精度の目標の±20%を示す。

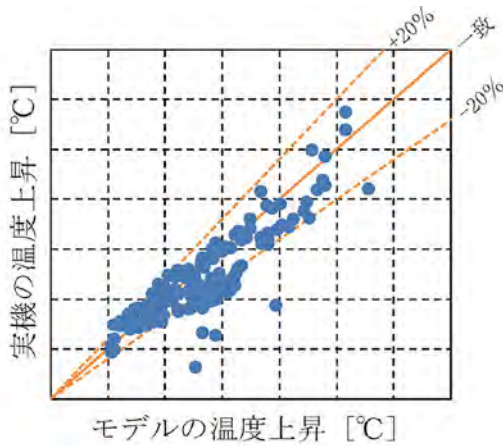


図7 技術運用の1年間の成績

温度精度の目標に入ったのは、118個の電子部品で勝率は66%の成績となった。

3.1 モデル精度の改善

技術運用の2年目からは、並行で敗因の分析とモデルの再検討を行った。敗因の分析では、図7のモデルと実機の温度上昇の比較結果を、電子部品ごとに分類したデータを使う。データの中で精度が大きく外れた結果に着目し、電子部品の変化点や設計の変化点を調べ、モデルの再検討をする。このやり方で、FETの発熱量、ICのモデリング、オイルのモデリングなどの見直しを行った。モデルの再検討後の結果を図8に示す。技術運用の1年間の敗因を分析しモデルの再検討を反映した結果と、その後も継続して技術運用した結果を合わせて示している。

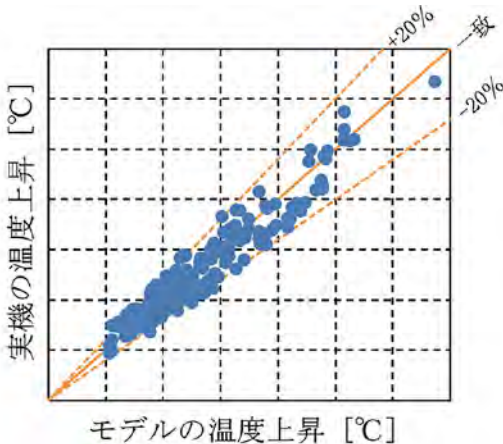


図8 技術運用の2年間の成績

総数で244個の電子部品の温度上昇を熱シミュレーションで予測し、温度精度の目標に入ったのは、218個の電子部品で勝率は89%に改善した。

3.2 解析リードタイムの改善

節2.1にて、コンデンサのモデリングは2つの実験で熱特性を同定する方法と説明した。技術運用の中で、実験データが貯まってきたので、予測式を作り電子部品の

モデリング時間、およそ1日を削減できないかを検討した。説明変数として、容量・耐電圧・直径・高さの4つを使って、コンデンサの熱伝導率を、式で予測した値と実測値を比較した結果を図9に示す。オレンジ色の線が、実測値と予測値が一致となる。

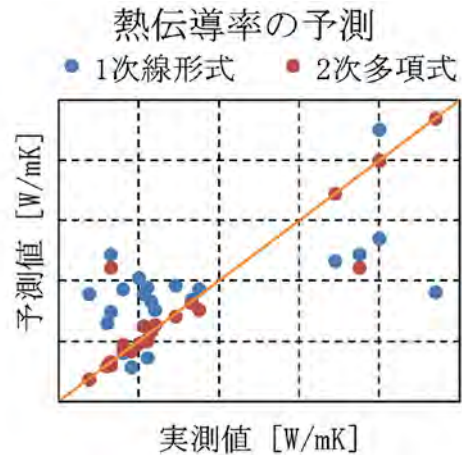


図9 コンデンサの熱伝導率の予測

青色の点のデータ、1次の線形の重回帰式では不十分となったが、赤色の点のデータ、2次の多項式では、それなりの予測ができています。この予測方法の検討は、コパイロットのGPT5を利用した。予測方法は、他にも決定木やランダムフォレストの提案があったが、利用性から2次の多項式の重回帰式を選択した。技術運用で解析リードタイムが厳しい場合は、実験無しの予測式でのモデリングを用いる。

4. おわりに

今回、機電一体型の電動ポンプについて、ECUの熱設計を目的に、そのツールとなる熱シミュレーションのモデル開発と運用を紹介した。現在、我々の組織では、シミュレーションの布教活動を始めている。布教活動は、製品展開と人員増加の2本柱で、製品展開はECU製品をパターン分類して数を絞って行っている。今後、製品展開を進め、製品違いによるモデルの差分を解決する中で、熱シミュレーションの技術をレベルアップしていく。

参考文献

- 1) 国峯尚樹,中村篤(株式会社オーム社):熱設計と数値シミュレーション,p17-22,2015
- 2) 国峯尚樹(株式会社シーエムシー出版):最新の熱設計・熱対策手法,p209-212,2025

筆 者



青山 泰崇

解析技術部
第2モデルベース開発室
電子製品のシミュレーション技術開発
に従事



平塚 裕太

ECU技術部 ECU第2設計室
電動ポンプドライバの企画・開発に従
事



服部 修二

電動アクチュエータ技術部
電動ポンプ設計室
電動ポンプ設計,小型モータ設計に従
事