

モーター熱流体解析の精度向上に貢献するモデル化手法の紹介

Modeling methods that contribute to improvements in accuracy of CFD analysis on electric motor

山内 拓也 石川 さとみ 猪上 美佳 沖 秀樹

Abstract

Yamaha Motor continues to work on development in electric mobility as this form of movement becomes widespread worldwide. In the development of electric mobility, heat remains as a very important issue. While electric components are heat-sensitive and therefore need to be designed accordingly, they are also required to be compact and cost-effective, which is a contradictory to the requirement. For this development, the company is conducting a desk study using commercially available Computational Fluid Dynamics (CFD) tools. This paper introduces the outline, issues, and modeling methods, and their validity confirmation of CFD tools for electric motors.

1 はじめに

電動モビリティの世界的な普及が進む中、当社でもその開発が進められている。電動モビリティ開発において、熱は非常に重要な課題である。電動コンポーネントは熱に弱く、適切に設計される必要がある一方で、熱の背反となるコンパクト化や低コスト化が求められている。開発にあたり、当社では市販熱流体解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)ツールを用いた机上検討を実施している。本稿ではモーターのCFDの概要、課題、モデル化手法とその妥当性確認について紹介する。

2 背景

近年、環境保全対応のため世界的に電動モビリティの普及が進んでおり、二輪メーカーでもバイクの電動化開発が本格化している。

当社では、「ヤマハ発動機グループ環境計画2050」として環境長期目標を掲げている。その中でカーボンニュートラル社会の実現に向けた技術戦略として、モーターサイクルのパートレイン構成比目標を2050年でBEV(Battery EV)90.0%と置いている。

電動化の多くの課題の内、重要な項目の一つが熱課題である。電動モビリティのメインコンポーネントは、モーター、バッテリー、MCU (Motor Control Unit) であるが、それぞれ熱課題を抱えている。モーターは、コイル被膜の絶縁破壊による故障や、磁石の減磁による出力低下が発生する可能性がある。バッテリーは他のコンポーネントより熱に弱く、熱のマネジメントが厳しい。MCUも最大動作温度を超えると、断線等による故障を起こしうる。以上のように、電動モビリティのコンポーネントは熱に弱く、熱を考慮した設計をする必要がある。

一方で、電動コンポーネントはレイアウトやコスト要件を満たすため、熱の背反となるコンパクト化や低コスト化が求められる。例えば、自然空冷モーターの出力を変えずにサイズを小さくしようとすると、発熱密度が大きくなる一方で、放熱面積が減るため温度が上昇する。上限温度を超えないような設計が必要であるが、超えてしまう場合は、より上限温度の高い部品の選択や、より冷却性能の高い冷却方式(強制空冷→水冷→油冷)を選択する。その場合、サイズやコストが増してしまう。単純に冷却性能を上げるだけでなく、サイズやコストを両立した設計が求められている。

これらのコンポーネントを開発するにあたり、試作前に机上での検討を実施している。当社では市販の熱流体解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)ツールを用いて、これら熱課題の机上検討を実施している。本稿ではモーターのCFDに絞り、モデル化手法について概要および妥当性確認について紹介する。

3 モーター熱流体解析の概要

3-1. モーター熱流体解析の目的と手段

モーター熱流体解析の目的は主に以下の2点が挙げられる。

- ・ 試作前の温度成立性の確認と対策
- ・ 試作後の実機検証で発生した課題に対する現象解明と対策

熱流体解析は、試作前の温度予測から試作後の現象把握・理解まで、製品開発において幅広く活躍している。

解析方法と結果処理方法は以下のとおりである。

- ・ コイルなどの損失が発生する部品の発熱条件の設定、空気/水/油などの冷媒温度の設定、放熱回路設定
- ・ 熱が懸念される部品の平均温度の取得、温度の図化(図1)

・ 熱や流体の流れなどを熱流束、流速ベクトルなどで図化
 実機評価では部品温度は分かるものの、なぜその温度になったのかがわからないことが多い。CFDにより熱や流れを可視化することで、現象を理解し対策方針の立案をすることができる。

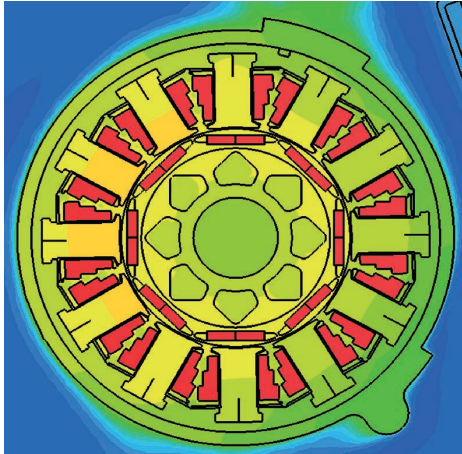


図1 モーター断面の温度分布の例

3-2. モーター熱流体解析の課題

当社ではエンジン等の製品開発時、熱流体解析を適用しており、そこで培ってきた技術がある。一方、モーターならではの課題がありその技術構築を進めている。ここからはその課題について説明する。

エンジンは燃焼室で発生した熱が金属の塊のヘッドシリンダーおよびボディーシリンダーを通り冷媒(空気/水/油など)に流れていく。一方、モーターは主にコイルで発生した熱がボビン、積層鋼板、ケースと多くの部品を通して冷媒に流れる。エンジンは構造体における入熱から放熱までの熱経路が比較的単純であるが、モーターは多くの部品を通り熱経路が複雑であることがわかる。

モーターには積層鋼板と呼ばれる鉄板(電磁鋼板)の積層材がある(図2)。積層される電磁鋼板の間には空気や接着剤が入り、鉄単体よりも熱が通りづらくなる。電磁鋼板の積層をそのまま再現することは形状再現性および計算コストの点で困難であり、このモデル化が課題である。

また、モーターは多くの部品を通して放熱されるが、必ず部品と部品の間には空隙が発生し、熱が通りづらくなる(図3)。この空隙をそのまま再現することは積層鋼板と同様、困難である。

これらの現象を考慮せず解析をすると、解析の精度が悪くなり、実機温度および現象の予測が正確にできなくなる。これらを考慮したモデル化手法を構築した。次章より記す。

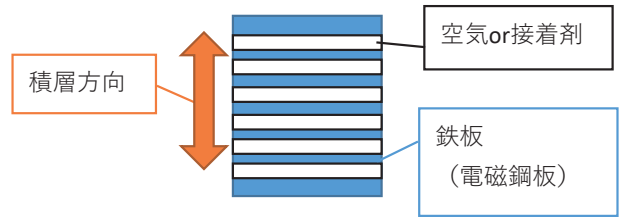


図2 積層鋼板の積層イメージ図

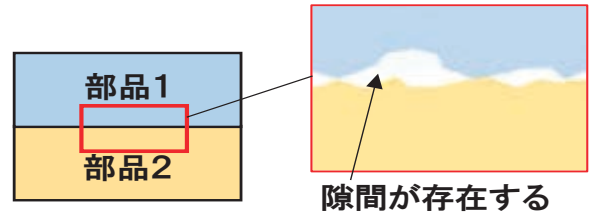


図3 部品接触部のイメージ図

4 モーターモデル化手法および妥当性確認

4-1. 積層鋼板のモデル化

4-1-1. モデル化概要

積層鋼板は図2のように鉄板が何層にも積み重なっている部品である。そのため、積層方向には必ず空気や接着剤が入り、部品全体の熱伝導率は電磁鋼板そのものの熱伝導率より小さくなる。今回、空気や接着剤を含めた積層鋼板を一つのブロックとして扱い、空気や接着剤分を考慮した熱伝導率(=等価熱伝導率)を適用するモデル化を行った。等価熱伝導率の算出方法について説明する。

積層方向は直列に熱抵抗が存在するため、熱抵抗の直列則が成り立つ。直列則から以下の等価熱伝導率の式を導き出せる。

$$\lambda_{eq} = \frac{t_{all}}{\frac{t_f}{\lambda_f} + \frac{t_a}{\lambda_a}} \quad \dots(1)$$

λ_{eq} : 等価熱伝導率
 t_{all} : 積層鋼板の総厚み
 t_f : 電磁鋼板の総厚み
 λ_f : 電磁鋼板の熱伝導率
 t_a : 空気層の総厚み
 λ_a : 空気の熱伝導率

この計算式の妥当性確認のため、実験と比較した結果を次節で示す。面内方向については、熱抵抗の並列則より算出でき、電磁鋼板の熱伝導率とほぼ同等の値となる。

4-1-2. 妥当性確認

積層鋼板の試験片を図4のように断熱材で囲み、上から熱を与え、上下の温度差を熱電対により測定する実験を行った。上下の温度差および、積層厚さ、断面積、投入熱量により、実験の熱伝導率を算出し、事前に求めておいた式(1)の結果と比較した(図5)。

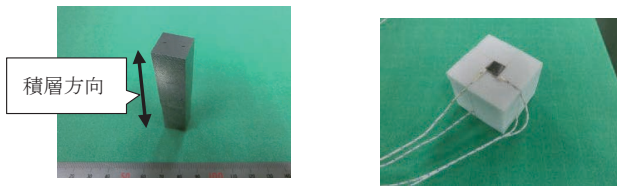


図4 試験状況(左:断熱材貼り付け前、右:断熱材貼り付け後)

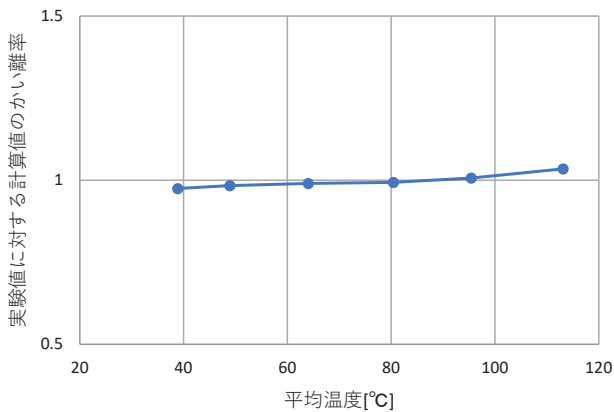


図5 熱伝導率の実験値に対する計算値の各平均温度でのかい離率

図5は熱伝導率の実験値に対する計算値のかい離率である。横軸の平均温度は実験の上下温度の平均であり、計算式ではこの温度における空気熱伝導率を用いている。実験値と計算値が各温度で非常に良く合っており、計算式の妥当性が確認できた。

4-2. ケースと積層鋼板の接触部のモデル化

4-2-1. モデル化概要

前章で説明したように、部品間には必ず空隙が発生し、熱が通りづらくなる。この部品間の熱の通りづらさは接触熱抵抗と呼ばれる指標で表される。ここでは、モーターケースと積層鋼板の接触熱抵抗のモデル化の例を示す。

一般的に用いられている接触熱コンダクタンス*を表す式である橋の式^[1]を以下に示す。

$$K = \frac{1.7 \times 10^5}{\delta_1 + \delta_0} \cdot \frac{0.6P}{H} + \frac{10^6 \lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \quad \dots (2)$$

K : 接触熱コンダクタンス [W/(m²·K)]

$\delta_{1,2}$: 各部品面粗さの最大高さ [μm]

δ_0 : 接触相当長さ (=23 [μm])

$\lambda_{1,2}$: 固体熱伝導率 [W/(m·K)]

λ_f : 流体熱伝導率 [W/(m·K)]

P : 接触圧力 [MPa]

H : 軟らかい方のピッカース硬度 [kg/mm²]

この式は部品の粗さや接触圧力などは考慮されているが、部品のうねりやそりなどは考慮されていない。この式の妥当性を確認するため、実験とCFDを実施し比較した。

*接触熱コンダクタンス: 接触熱抵抗の逆数を面積で割った値であり、単位面積当たりの熱の通りやすさを示している。

4-2-2. 妥当性確認

積層鋼板がはめられたケースに対し、周囲に熱量を与えるためのヒーターと断熱材で囲み、ケースと積層鋼板の温度差を測定する実験を行った(図6)。同時に、この実験を模擬したCFDを実施した(図7)。CFDでは、ケースと積層鋼板の接触部に接触熱抵抗を入れない場合(接触熱抵抗なし)、式(2)で算出した接触熱コンダクタンスを与えた場合(計算値)、ケースと積層鋼板の温度差が実験とおおよそ同じになるように同定した場合(同定値)の3ケース実施した。

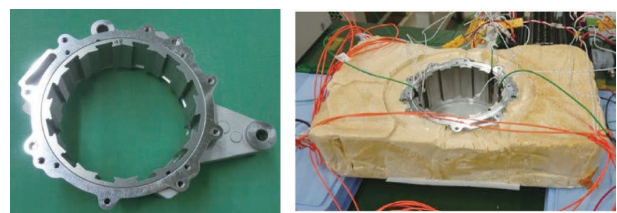


図6 試験状況(左:断熱材貼り付け前、右:断熱材貼り付け後)

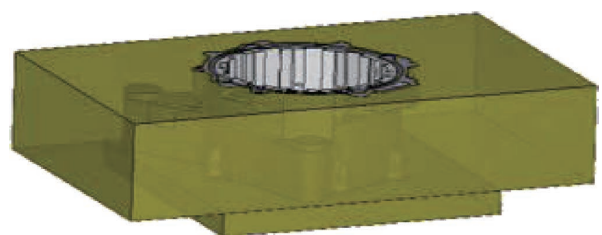


図7 CFDモデル

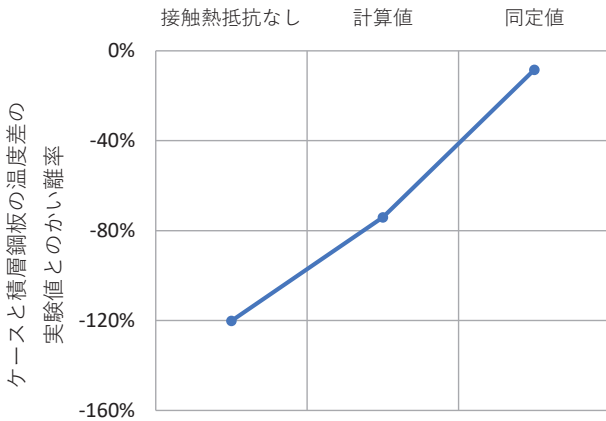


図8 ケースと積層鋼板の温度差の実験値に対するCFD値の偏差率

図8はケースと積層鋼板の温度差の実験値に対するCFD値の偏差率を示している。接触熱抵抗なしに対し、計算値は実験値に近づいているが、実験値および同定値と比べ偏差が大きくなる。原因としては、式(2)のうねり等が考慮されていない点、ケースとのめあい面である積層鋼板の積層面が図9のように段差になっており、接触面積が減少している点の2点が考えられる。式(2)の値を用いてCFDを行う場合、これらを考慮した補正が必要であり、図9の接触状況を基にした補正方法を現在検討中である。

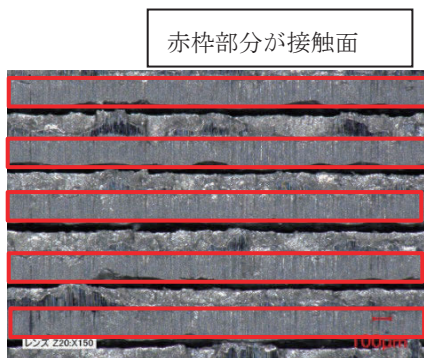


図9 積層鋼板の積層面の拡大画像

4-3. モーター全体解析における寄与度確認

ここまででは、部品単体レベルであったが、モーター全体の解析にて、今回検討したモデル化を適用することでどれだけ精度が向上したかを確認した。

モーター全体での実験とそれを模擬したCFDを実施し比較した。今回はモーターの開発において主に熱の懸念となるコイル温度を比較した。CFDに関しては、表1のように積層鋼板のモデル化およびケースと積層鋼板接触部のモデル化について仕様をふった。

表1 CFD仕様

	CFD仕様			
	case1	case2	case3	case4
積層鋼板のモデル化	積層未考慮	積層考慮(計算値)		
ケースと積層鋼板接触部のモデル化	接触熱抵抗なし		計算値	同定値

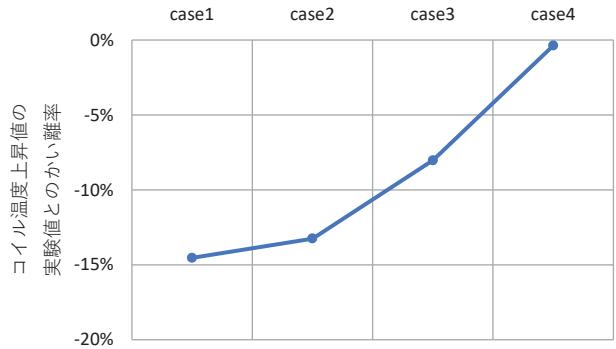


図10 コイル温度上昇値の実験値に対するCFD値の偏差率

図10はコイル温度上昇値の実験値に対するCFD値の偏差率を示している。各項目を見直すことで実験値との偏差は小さくなっており、case4の積層鋼板の等価熱伝導率の計算値とケース-積層鋼板接触部の接触熱抵抗の同定値を用いることで、実験値にかなり近い値を得ることができた。また、case2からcase4に向けて実験値に大きく近づいていることから、ケースと積層鋼板接触部の接触熱抵抗を正確な値に設定することが、温度予測精度の向上において重要な点であることが分かった。

5 おわりに

当社で構築しているモーター熱流体解析のモデル化手法について紹介した。

今回紹介した積層材のモデル化および接触部のモデル化の見直しにより温度予測精度が大幅に向上した。

電動モビリティの開発が加速し、開発の中で求められる要求レベルが上がる中で、開発に役立つ解析手法を今後も構築していく。

■参考文献

[1] 橋 藤雄:日本機械学会誌, 55-397, 102-107(1952)

■ 著者



山内 拓也

Takuya Yamauchi

技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



石川 さとみ

Satomi Ishikawa

技術・研究本部
NV・技術戦略統括部
新事業推進部



猪上 美佳

Mika Inoue

技術・研究本部
技術開発統括部
先進プロダクト開発部



沖 秀樹

Hideki Oki

技術・研究本部
AM 開発統括部
AM 第2技術部