

熱シミュレーションを用いたインホイールモーターハウジングの設計と試作

機械電子科 針幸達也 長津義之 岩澤 秀 渥美博安

Design of in-wheel motor housing and trial production using thermal simulation

HARIKO Tatsuya, NAGATSU Yoshiyuki, IWASAWA Shigeru and ATSUMI Hiroyasu

In recent years, automakers have been adopting lighter materials to address increasing weights due to tighter fuel economy regulations and the use of large capacity batteries in electric vehicles. In order to use a new material for an automobile part, it is necessary to measure its behavior during the processing and use of the material or to predict it by computer simulation. In this report, an in-wheel motor housing was designed giving consideration to actual usage environments by using computer simulation. Design parameters of the computer simulation were optimized by means of the parameter design method in quality engineering. Heat dissipation of a trial in-wheel motor product was shown to have the same tendencies as the one in the simulation. It was found that the parameter design method was effective for designing in-wheel motors.

Keywords : Thermal deformation simulation, Quality engineering Parameter Design, In-wheel motor

キーワード : 熱変形シミュレーション、品質工学、パラメータ設計、インホイールモーター

1 はじめに

近年、燃費規制の強化や次世代自動車における大容量バッテリー搭載による重量増加に対応するため、自動車メーカーは、軽量化素材の採用を進めている。自動車部品に、新しい素材を使うためには、加工や使用の際の挙動を、実測またはシミュレーションによって予測することが必要である。

新製品の開発では、初めに設計したものが要求性能を満たすか試作して評価を行う。評価が要求性能を満たすものであれば生産し市場に出すこととなるが、1度の試作で要求を満たすものができることはまれで、実際には試作し評価した後、設計を手直しし再び試作、評価を行う。このサイクルを要求性能を満たすまで繰り返す。しかし試作には時間とコストがかかる。開発初期段階でシミュレーションを用い、試作回数を減らすことが開発の効率化に役立つと考えられる。

我々は、製品の使用時に発生する熱によるトラブルを防ぐことを目的とし、熱シミュレーションを用いた設計法や熱変形によるひずみを精密に測定するシステムを開発し、効率のよい開発プロセスの構築に取り組んだ。本報告ではインホイールモーターのハウジングを対象に実際の使用環境を考慮し、放熱性が高く、熱変形しにくいハウジングの設計をシミュレーションを用いて効率よく行った事例について報告する。

インホイールモーターは電気自動車に搭載されるモーターの1種である。現在主流のオンボードタイプのモーターとは異なり、各タイヤのホイールの中にモーターが格納されている。オンボードタイプのモーターに比べモーターが小型であること、それぞれのタイヤを独立に駆動するため操舵性が良いなどのメリットがある。インホイールモーターは地面に近い場所にモーターがあるため、砂塵や水などによりモーターが故障する可能性がある。そのためインホイールモーターのハウジングには密閉性が必要である。さらに密閉性の高いハウジングの中に発熱するモーターが収納されているため、ハウジング内部の空気温は上昇する。モーターに使用される磁石はおよそ 373K から磁力が弱まり始め、423K を超えるとモーターとして機能しなくなる。またインホイールモーターのハウジングには自動車の軽量化のため、軽いアルミ合金が用いられるがアルミ合金は熱膨張率が大きく熱変形しやすく、モーターが発する熱でハウジングが変形し、すき間が生じる可能性がある。そのためインホイールモーターのハウジングには密閉性と放熱性が重要な要求項目となる。そこで本研究では放熱性が高く、変形しにくいインホイールモーターのハウジングの形状をシミュレーションを用いて設計した。設計パラメータの最適化には品質工学のパラメータ設計の手法を用い設計の効率化を図った。さらに設計した

インホイールモーターハウジングモデルを試作し、シミュレーションの妥当性を検証した。

2 方法

2.1 インホイールモーターハウジングの設計

インホイールモーターハウジングの設計は以下の2段階で行った。

①放熱性の高いモデル作成のための熱流体シミュレーションによるパラメータ設計

②熱変形の少ないモデル作成のための伝熱シミュレーションによるパラメータ設計

モデルの作成、熱流体及び伝熱シミュレーションには Solidworks を用いた。

次に①、②で求められた放熱性が高く熱変形の少ないモデルを実際に試作し、シミュレーションの結果の妥当性を検証した。

①放熱性の高いモデルの作成

検討するインホイールモーターハウジングのモデルを図1に示す。アルミ合金製でモーターを収納するケース部分と蓋部分で構成されている。内部にはモーターを模した250Wで発熱するブロック状の発熱体を配した。また蓋上部から風を吹き付けた。パラメータ設計の実験計画¹⁾に基づきハウジング内部の空気の温度を熱流体シミュレーションによって求めた。パラメータ設計のための制御因子を図2、その水準を表1に示す。

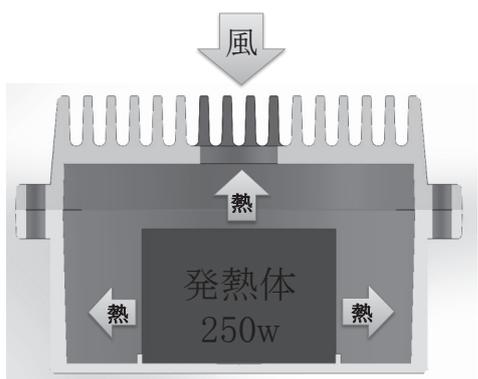


図1 検討したインホイールモーターハウジングモデル

放射率の水準は実際にアルミ合金を測定した値を用いた。放射率0.1は塗装無し、0.3は表面を白く塗装、1.0は黒く塗装したものである。パラメータ設計では評価項目がばらつくように誤差因子を与えて実験を行い誤差因子に対するロバスト性（誤差因子下でもばらつきが少ない）を評価する。今回はハウジング内部の温

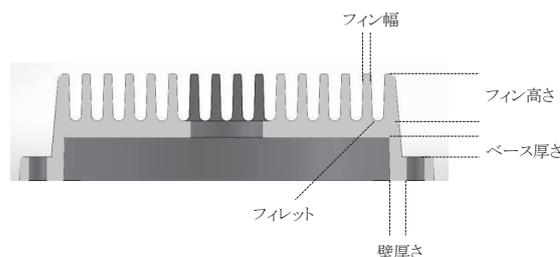


図2 最適化した制御因子

表1 熱流体シミュレーション用制御因子

		1	2	3
A	フィン/ピン	フィン	ピン	
B				
C	フィン高さ	5	15	30
D	フィン幅	3	6	9
E	ベース厚さ	5	7.5	10
F	壁の厚さ	5	10	15
G	外側放射率	0.1	0.3	1.0
H	内側放射率	0.1	0.3	1.0

単位はmm

空欄にはパラメータを割り付けていない。直交表のB列は空き列とした。

度が低くなる条件（N1条件）と高くなる条件（N2条件）を誤差因子とした。N1条件は外気温が283K、風速が22.6m/s、N2条件は外気温が313K、風速が6.8m/sとした。風速は燃費計測に一般的に用いられるJC08モードで走行した場合の最高速度と平均速度である。

この制御因子と誤差因子をL18直交表に割付けてシミュレーションによる実験を行い評価した。

②熱変形の少ないモデルの作成

①で求められたモデルを基に熱変形の少ない蓋部分のモデルを伝熱シミュレーションによるパラメータ設計によって求めた。評価項目は熱を加えた時の全体の最大変位、ケース部との接合部の変位、中心部の穴の内径の変位とした。パラメータ設計のための制御因子とその水準を表2に示す。誤差因子は①の実験と同様とした。パラメータ設計による実験には品質工学の考えを取り入れた最適設計ソフトJIANT²⁾を用いた。JIANTは宇宙航空研究開発機構（JAXA）で開発されたソフトでシミュレーションを行うCAEソフトと連携して使用し、シミュレーションによるパラメータ設計のための実験計画の作成、シミュレーションによる実験の自動実行、自動解析を行うことができる。①の実験では熱流体シミュレーションがJIANTとの接続のためのAPI（Application Programming Interface）に対応していなかったためJIANTを使用できなかったが、②の実験では伝熱シミュ

【報告】

レーションが API 対応であったので JIANT による自動実験、自動解析を行った。最適条件の決定には従来のパラメータ設計で用いられている要因効果図を用いた方法ではなく、JIANT のランキング機能を用いた。

2.2 シミュレーションの検証

シミュレーションによるパラメータ設計から得られた放熱性が高く、熱変形が少ないモデルを実際に試作し、検証した。得られた最適モデルを3Dプリンタによって樹脂モデルに成型した(写真1)。次にこの樹脂モデルから砂型を作製し、AC4C アルミ合金で鋳造した(写真2)。また同じ表面積のピンタイプのハウジング(写真3)も試作した。

検証のための実験装置を写真4に示す。鋳造したイ

ンホイールモーターハウジングの中にモーターを模したヒーターブロックを入れ内部から加熱できるようにした。インホイールモーターハウジングは外部の影響を受けないようにアクリル製のケースに入れた。ケース内部にはハウジングに風を当てられるようにファンが設置してある。ヒーターブロックを加熱したときのハウジング内部の空気の温度を計測し、シミュレーションの妥当性を検討した。

3 結果

3.1 インホイールモーターハウジングの設計

①放熱性の高いモデルの作成

熱流体シミュレーションによるパラメータ設計は望小

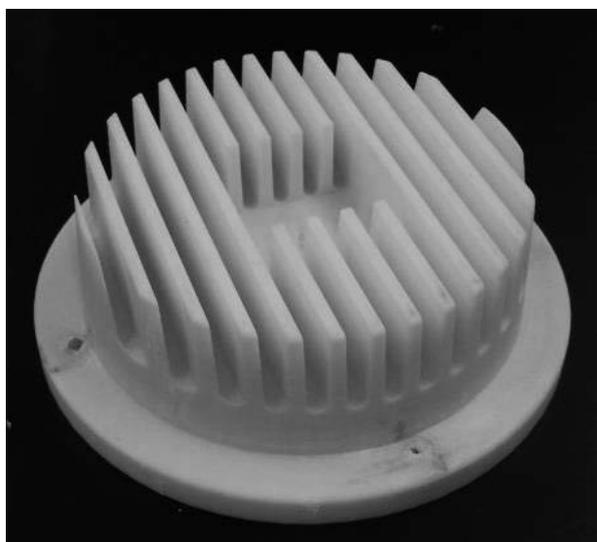


写真1 成型した樹脂モデル

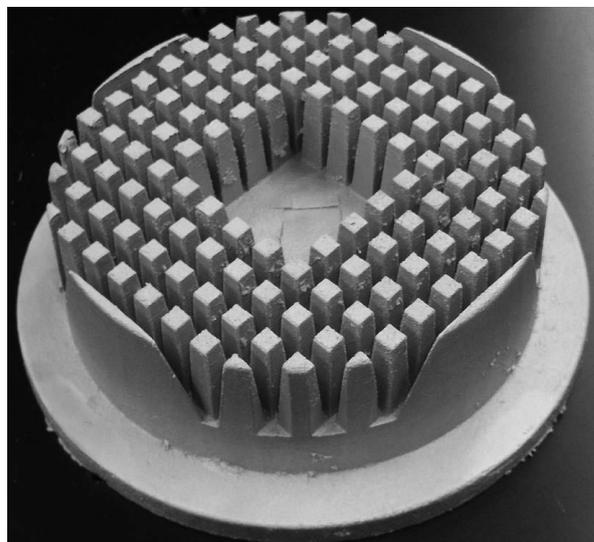


写真3 試作品 (ピンタイプ)

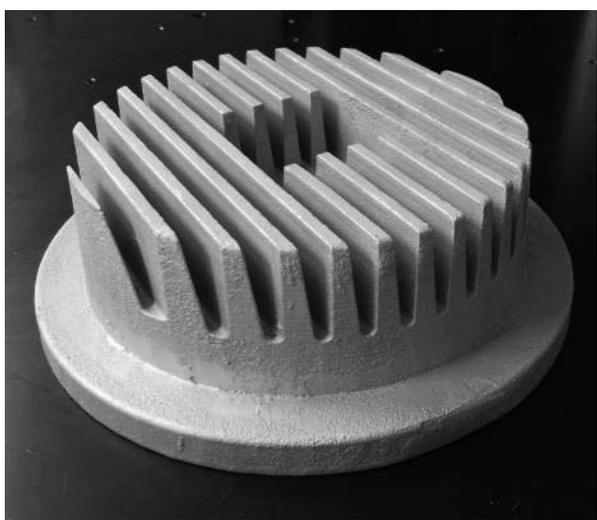


写真2 試作品 (フィンタイプ)

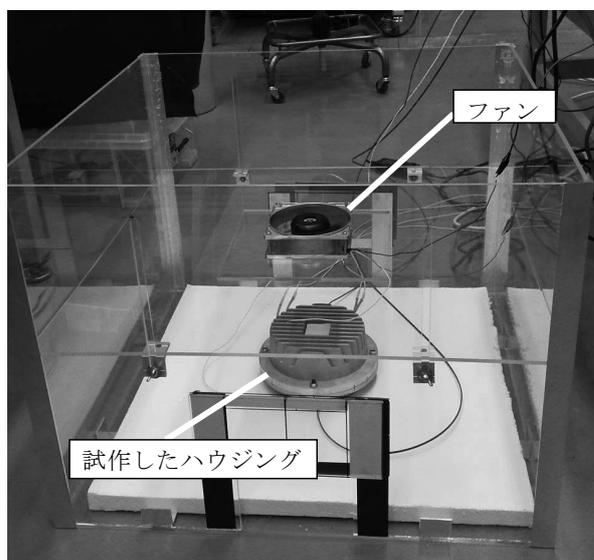


写真4 実験装置

特性の SN 比で評価した。SN 比は平均値と分散の比で、望小特性の場合、評価項目の値が小さく、誤差因子によるばらつきが小さいほど大きな値となり、SN 比が大きいほど放熱性が高いと判断できる。熱流体シミュレーションによるパラメータ設計から得られた要因効果図を図3に示す。要因効果図では水準を変えた時、SN 比の変化が大きいパラメータが評価項目に対する寄与が大きいと判断する。フィンの高さは水準を変えると SN 比が大きく変わり放熱性に対する寄与が大きいことが分かった。

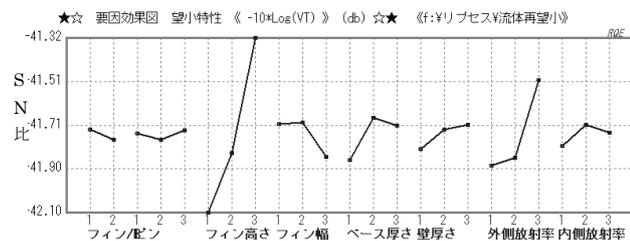


図3 要因効果図

また放射率の寄与も大きく、黒く塗装すると放熱性がよくなることが分かった。それ以外のパラメータの寄与は大きくなかった。パラメータ設計では各パラメータの効果を独立して求められるので要因効果図の SN 比が大きい水準を選択したものが最適モデルとなる。今回の実験ではフィン形状、フィン高さ 30mm、フィンの幅 4.5mm、ベース厚さ 10mm、壁の厚さ 7.5mm、黒く塗装が最適条件であった。最適条件のモデルをシミュレーションした結果、放熱対策しないモデルが 395K だったのに対し、最適モデルは 356K で、内部空気の温度が 39K 低い値を示した。

②熱変形の少ないモデルの作成

伝熱シミュレーションによるパラメータ設計も望小特性の SN 比で評価した。最適条件は JIANT のランキング機能から、フィンの根元のフィレットφ3mm、フィンの高さ 25mm、フィンの幅 4.5mm、ベース厚さ 10.2mm、

壁厚さ 7.3mm、接合部厚さ 15mm となった。フィンの幅とベース厚さは熱変形に対する寄与が小さかったので軽くなる水準にチューニングしてフィンの幅 4.3mm、ベース厚さ 9.8mm を最適条件とした。これにより放熱性が良く、熱変形が少ない軽いモデルを設計することができた。

最適条件のモデルをシミュレーションした結果、接合面の変位は放熱対策無しモデルが 0.13mm だったの

に対し、最適化モデルは 0.08mm となり約 40% 小さくなった。

3.2 シミュレーションの検証

ヒーターブロックを加熱し内部空気の温度が安定した 2 時間 30 分後の温度を計測した。内部空気の温度を図4に示す。フィンタイプもピンタイプも放熱性に大きな違いは見られなかった。またフィンタイプを黒く塗装したハウジングは温度低下が見られた。

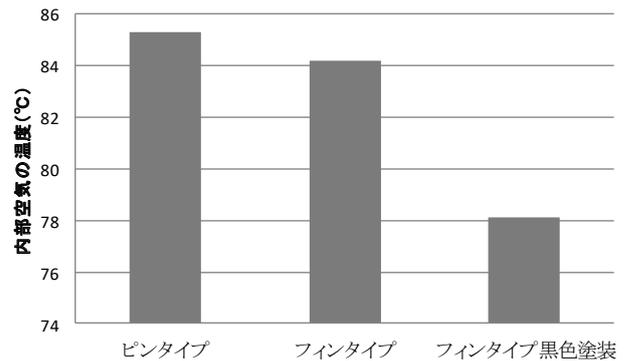


図4 試作品の内部空気の温度

4 考察

コンピュータシミュレーションを用いたパラメータ設計からインホイールモーターのハウジング形状について放熱性に対しては表面積の寄与が大きく、ほぼ表面積のみで放熱性が決まってしまうことが分かった。そのため他の設計パラメータは重さやコストなどを考慮しながら自由に決めてよいと考えられる。

試作品による検証の結果から表面積が同じであればフィンの形状による違いが無いこと、黒く塗装することで放熱性がよくなることが確認できた。これはシミュレーションによるパラメータ設計から得られた要因効果図の結果と一致している。シミュレーションによるパラメータ設計の結果が妥当であることが確認できた。

5 まとめ

シミュレーションによるパラメータ設計からインホイールモーターのハウジングの設計を行い、試作し検証した。ただシミュレーションをして設計するのではなくシミュレーションとパラメータ設計を組み合わせることで少ないシミュレーション回数で効率よく設計することができた。またパラメータ設計によって得られる要因効果図には今後の設計の指針となる情報が含まれ、設計ノウハウの見える化が可能になると考えられる。設計において

シミュレーションによるパラメータ設計が有効であることがわかった。

謝辞

JiANT を提供していただいた JAXA の角有司氏に感謝いたします。また、解析結果の検討をしていただいた浜松品質工学研究会会員の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 田口玄一：品質工学講座1, 「開発設計段階の品質工学」, (日本規格協会, 東京), 吉澤正孝 編集 pp.73-90 (1988)
- 2) 角有司 他：製品情報と運用情報の組み合わせ探索による概念設計手法の研究 (第3報：発散・収束プロセスによる最適設計システムの提案). 日本機械学会, 第27回設計工学・システム部門講演会, 2017.9.