

# 小型電気自動車向けePowertrainの開発

Development of ePowertrain for Small Electric Vehicles

高橋 知宏  
Tomohiro Takahashi

相澤 伸哉  
Shinya Aizawa

石川 諒  
Ryo Ishikawa

湊 純司  
Junji Minato

富永 麗司  
Reiji Tominaga

## 要 旨

近年、アジアを中心に小型EV（Electric Vehicle）の普及が期待されており、その普及には航続距離の拡大と車両の低価格化が必要であるため、電動パワートレインにも軽量・高効率による電費向上と低コスト化が求められている。そのため当社は、駆動・電源ユニットを1つの筐体（きょうたい）に統合した電動パワートレインを業界で初めて開発した。本製品の技術的なポイントは2点。1点目は、電磁界解析による回路基板の等価回路モデル化とモータの実動作を再現する等価モデルの開発によりインバータのサージ電圧を低減させ、小型高回転モータを駆動可能な高効率回路を実現した。2点目は、熱流体解析と強度解析を用いて、小型でかつ厳しい車載環境に耐えうる新規放熱構造を開発することで、放熱器のサイズを削減した。本技術により、2016年開発品比で全体の体積50%低減、重量30%低減、コスト18%低減、電力変換効率90%以上を達成し、EVの航続距離48%増に寄与した。

## Abstract

In recent years, the spread of small electric vehicles (EV) was expected mainly in Asia. It is necessary to increase the cruising distance, lower the cost of the vehicle for widespread use, and improve the electric consumption by producing a lightweight and efficient EV. With this, we developed an electric powertrain (ePowertrain) that integrates a drive and power supply unit into a single housing. This study aimed to realize a highly efficient circuit capable of driving a compact high-speed motor by reducing the surge voltage of the inverter through the development of a substrate equivalent circuit model by electromagnetic field analysis and development of the equivalent model that can reproduce the actual motor operation. Moreover, we want to reduce the size of the heat sink by halving it and developing a new heat dissipation structure that is small and applicable to the in-vehicle severe environment using thermal fluid analysis and strength analysis. With this technology, we reduced the ePowertrain size by 50% and weight by 30%, achieved an efficiency of more than 90%, contributed 18% cost reduction and accomplished 48% more cruising distance compared with the 2016 prototype.

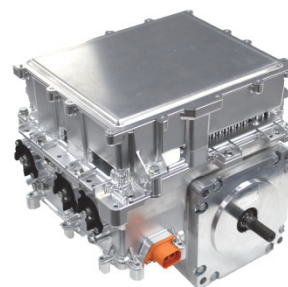
## 1. はじめに

近年、世界的なe-コマース（Electronic Commerce：電子商取引）の増加による輸送の拡大と、環境規制に伴うガソリン車使用の規制から、アジアを中心に都市内を移動可能な小型EV（Electric Vehicle）の普及が期待されている[1][2]。

一般的なEVの普及に向けて解決すべき課題は車両の低価格化と航続距離の拡大、充電時間の短縮であり、特に小型EVでは低価格の車両でありながらも一定の航続距離を確保したいニーズがある。そのため、高効率（高い電力効率）な小型の電動パワートレインが必要となる。

今回開発した電動パワートレイン（ePowertrain）は、安全電圧である60V以下（注1）をシステム電圧とすることで感電保護部品および絶縁部品の削減、低耐圧部品の採用を可能とした。さらに、電動パワートレインを構成する

コンポーネントのうち、駆動インバータと車載充電器、14VDCDCコンバータを1つの筐体（きょうたい）に統合省線化することで、小型軽量・高効率・低コストを実現している。これらの構成に加えてモータと放熱器の小型軽量化により、全体の体積を従来比50%低減、重量30%低減、電力変換効率90%以上を達成し、小型EVの部品搭載スペース拡大による電池搭載容量の増加と効率改善で航続距離48%増を実現した。第1図は開発した電動パワートレインの外観である。



第1図 48V電動パワートレイン（ePowertrain）  
Fig. 1 48V electric power train（ePowertrain）

（注1）次の規格に基づく。IEC61851-1 Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements, IEC60950-1 Information technology equipment - Safety - Part 1: General requirements.



第1表 従来システムとの仕様比較

Table 1 Comparison of conventional and proposed product specification

		従来システム	今回システム	
車両	航続距離 [km]	87	129	
	電費 [km/kWh] (JC08モード)	13.2	14.9	
	電池搭載容量 [kWh]	6.6	8.7	
電動パワートレイン	効率 [%]	86	91	
	重量 [kg]	62	45	
	体積 [L]	全体	38	19
		モータ	6.0	4.1
放熱器		2.5	0.6	

2.2 小型高回転モータ駆動に伴う課題

一般に、モータを高回転化すると、小型軽量化することができる。今回、モータの最高回転数の目標仕様を従来の6500 min<sup>-1</sup>から12000 min<sup>-1</sup>へと高速化することで、小型軽量化を図った。モータを高回転駆動する際、モータ電流の歪（ひず）みによる効率悪化を避けるため、インバータのスイッチング周波数を高周波化する必要がある。高周波化には、パワーデバイスのスイッチング時間を短くする必要がある。しかし、(1)式に示すサージ電圧算出の式より、スイッチング時間を短くすると、サージ電圧が大きくなる。

$$\Delta V = L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

$\Delta V$ ：サージ電圧， $L$ ：寄生インダクタンス，  
 $di$ ：電流変化量，  
 $dt$ ：単位時間（スイッチング時間）

高周波化に伴うサージ電圧の増加量を算出したところ、パワーデバイスの絶対最大定格100Vを超えたため、対策が必要になる。しかしながら、一般的な対策ではインバータのサイズの増加に繋（つな）がり小型化と背反するため、サイズを増加させずにインバータの高周波化を実現する必要がある。

2.3 放熱器小型化に伴う課題

今回、放熱器の体積を2.5Lから0.6Lまで削減する必要があるが、放熱器を小型化すると放熱フィン（以下フィン）の放熱面積が減少するため、フィンから外気への熱抵抗が低下する。また、EVでは加速時や登坂時にインバータの出力電流が最大となりデバイスが急激に発熱するため、一定の熱容量を確保し、発熱を $\Delta 65^{\circ}\text{C}$ 以下に抑制する必要がある。時間による温度上昇の式を(2)式に示す[3]。

$$\Delta T = R_{jf} \times W \times (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_{jf} \times C}}) \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta T$ ：温度上昇分， $R_{jf}$ ：熱抵抗， $W$ ：損失

$\Delta t$ ：時間， $C$ ：熱容量

以上より、熱容量に対する制約を守りながらも、放熱器の小型化と熱抵抗の低下を両立可能な構造を実現する必要がある。

第3章に、モータの高回転化と放熱器の小型化に対する課題解決に向けたアプローチについて述べる。

3. 小型軽量化技術

3.1 サージ電圧を低減した高効率インバータの開発

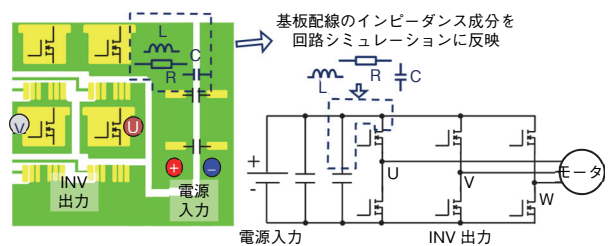
電磁界解析による回路基板の等価回路モデルとモータの実動作を再現する等価モデルを構築し、従来困難であったモータ駆動中の過渡応答を模擬した回路解析での基板配線と部品配置検討を可能とした。それにより、高回転化に伴うインバータのサージ電圧を低減する回路トポロジーが設計でき、高回転化と高効率を両立しながらモータのサイズを従来比31%小型化、重量を27%軽量化した。

以下にサージ電圧低減のアプローチの詳細を記載する。

〔1〕回路トポロジー設計可能なシミュレーション構築  
 サージ電圧の対策として、次のような方法がある。

- ①：耐圧の高い（オン抵抗が大きく損失が多い）パワーデバイスを採用する方法
- ②：スナバ回路を追加し、サージ電圧を熱に変える方法
- ③：コンデンサを基板配線に配置する方法

①②の方法はいずれも効率悪化による放熱器のサイズの増加に繋がる。一方、③の方法は効率悪化に繋がらない。しかし、③では、サージ電圧を正確に試算するための解析技術が必要であったが、複雑な計算であるため、従来のシミュレーションではサージ電圧を低減する回路構成を設計することが困難であった。この課題解決のため、回路基板の寄生インピーダンスと、モータ駆動による過渡応答を考慮した等価回路モデルを考案し、回路シミュレーションにて短時間で解析が可能な設計手法を構築した。ここで、回路基板の等価回路モデルの作成に際しては、基板配線の寄生インダクタンスLを電磁界解析にて取得した（第5図）。

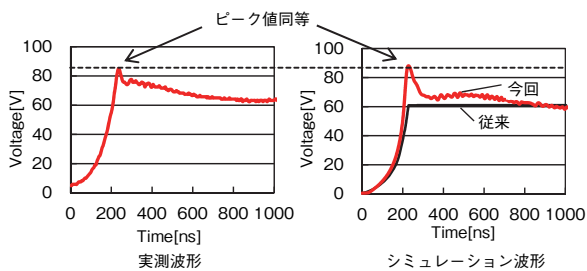


第5図 寄生インピーダンスの模擬  
 Fig. 5 Simulation of parasitic impedance

さらに、モータ駆動での過渡応答を考慮した等価回路モデルの開発に際しては、開発機にて採用する最大トルク制御での位相遅れを組み込み、モデルを高精度化した。

以上により、回路基板の寄生インピーダンスとモータ制御による過渡応答を考慮したサージ電圧の解析を、計算負荷の低い回路シミュレーションにて可能にした。

第6図に最大出力条件（60 V）時の実測波形と、今回開発したシミュレーションの計算結果を示す。第6図に示すように、シミュレーション結果は実測波形に近いサージ電圧が得られていることがわかる。これにより、本手法でサージを含めての設計保証が可能になった。



第6図 シミュレーションと実測波形比較  
Fig. 6 Comparison of simulation and actual waveforms

[2] 高速駆動対応高效率インバータの開発

[1]で構築した方法でインバータ回路の基板配線と部品配置検討を行い、サージ電圧がパワーデバイスの部品定格100 Vを超えないように設計を行った。設計に際しては、部品パラメータのばらつきまでを考慮した。その結果、最悪条件下においても91 Vの試算が得られ、部品定格を超えない設計を実現した。さらに、開発機においても、サージ電圧の低減により部品定格を満足することを確認した。

以上の取り組みにより、モータ回転数を従来比1.8倍に高速化するインバータ回路を開発し、モータの体積を従来比31%小型化、重量を従来比27%軽量化した。

3.2 新規放熱構造による放熱フィン体積の削減

放熱器の小型化に向けて、下記2点の検討を実施した。

1点目はフィンのピッチを狭くして体積あたりのフィン枚数を増やし、ヒートシンクの熱抵抗を低減させる点であり、2点目は各コンポーネントの放熱器を共用化して、熱抵抗を低減させながら熱容量を増加させる点である。

[1] ヒートシンクの表面積の増加

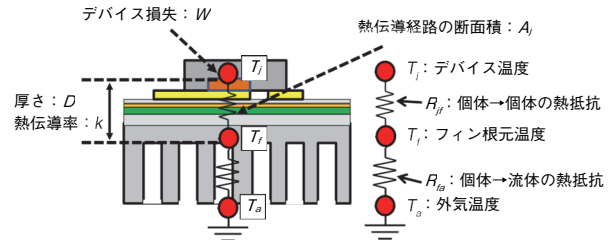
デバイスから外気までの熱抵抗を構成要素に分解し、改善すべきパラメータを決定する（第7図）。

デバイス温度（ $T_j$ ）は以下の式で算出できる。

$$T_j = T_a + W(R_{jf} + R_{fa})$$

$$= T_a + W \left( \frac{D}{k \times A_j} + \frac{1}{h \times A_f} \right) \dots \dots \dots (3)$$

$W$ : デバイス損失  $D$ : 厚さ,  $k$ : 熱伝導率,  
 $A_j$ : 熱伝導経路の断面積,  
 $h$ : フィンの熱伝達率,  $A_f$ : フィン表面積



第7図 熱抵抗モデル  
Fig. 7 Thermal resistance model

(3) 式からデバイスの温度（ $T_j$ ）を低減させるには $R_{jf}$ もしくは $R_{fa}$ を低減させる必要がある。

$R_{jf}$ の低減にはデバイス直下の面からフィン根元底面までの厚みを減らす方法があるが、(4)式に示すとおり体積が減ると熱容量（ $C$ ）が低減するため、インバータの最大出力電流時のデバイスの急激な温度上昇を抑えることができない。

$$C = c \times \rho \times V \dots \dots \dots (3)$$

$c$ : 比熱,  $\rho$ : 密度,  $V$ : 体積

また、放熱器のサイズを増加させずに $R_{fa}$ を低減させるにはサイズあたりのフィンのピッチを狭くする必要がある。しかし、ピッチを狭くしすぎるとファンの風速が落ちるため、熱流体解析により最も熱伝達率が高くなるようにピッチを決定した。その結果、ダイカストの铸造性確保の限界を超えた狭いピッチ（5 mm）であったため、新放熱構造による狭ピッチ化が必要となることが判明した。

[2] ヒートシンクの共用化

第2表に示すように、各コンポーネントを平面方向に単純統合すると、非動作側のフィンまで熱が伝わらないため、サイズあたりの放熱能力が悪くなる。サイズ低減

第2表 単純統合の構造  
Table 2 Structure of simple integration

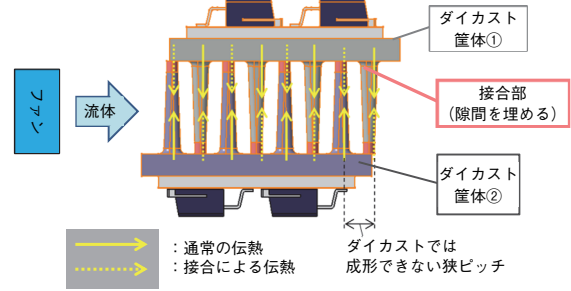
構造	平面	両面	両面嵌合
イメージ (インバータ 動作時)			
サイズ	×	×	○

のため、フィン同士を嵌合（かんごう）させるように配置する両面放熱構造を考案したが、フィン同士隙間が発生し熱が伝わらない。

よって、各ヒートシンクを共用化し放熱能力を向上させるには、隙間を埋める新たな工法を検討する必要がある。

〔3〕新規放熱構造

これまで述べたように、高放熱を実現するにはヒートシンクの狭ピッチ化と共用化の両立が必要であると見極めたため、その構造を実現する工法を比較検討する（第3表）。



第8図 新規放熱構造のコンセプト  
Fig. 8 Concept of new heat dissipation structure

第3表 成形方法の比較

Table 3 Comparison of molding method

成形方法	ロール成形	押出成形	ダイカスト
イメージ			
形状自由度	×	×	○
ピッチ	○	△	×
コスト	×	×	○
接合性	○	○	△

第3表に示すとおり、ロール成形と押出成形はリブやねじボスなどの複雑形状の対応が難しく、電気部品の構成を含めた大幅な構造見直しが必要となる課題が発生する。一方、ダイカストは金属接合性が悪いため、他の成形品での接合方法として一般的に用いられている溶接やロウ付けの採用は困難である。しかし、形状自由度は高いため、溶接やロウ付けとは別の接合方法により代替し、かつ狭ピッチでフィン形成できればコストメリットが大きい。低コストで新規構造を成立させるため、ダイカストを用いたヒートシンクの狭ピッチ化と共用化を検討する。

第8図に新規放熱構造のコンセプトを示す。

小型化を実現しながらピッチを狭くする方法として第2表の両面嵌合構造に着目し、フィン同士を高放熱材料で接合できれば、見かけ上の狭ピッチを実現することで放熱面積を増やせ、かつヒートシンクの共用化が可能になる。

第8図のコンセプトを実現するため、フィンを高放熱材料で接合する方法を検討する。アルミダイカストに適用可能な接合方法を第4表に示す。

第4表 接合方法の比較

Table 4 Comparison of bonding methods

接合方法	放熱接着剤	放熱シート	はんだ
コスト	○	△	×
熱伝導	○	○	◎
組み立て性	○	×	○

放熱シートは反力によるダイカストの変形を防ぐため、柔らかい材質である必要があり、今回のように広い面積に設置する場合に組み立て性が悪い。また、はんだ接合は小物のダイカスト製品に対して産業用などで使用される接合方法だが、はんだをするためにめっきが必要なため、今回のダイカストのサイズではコストが高くなる。よって、放熱接着剤が今回の接合方法に最も適していると判断した。

以上から、今回の要件を満たす放熱接着剤（以下、TIM：Thermal Interface Material）の開発に取り組んだ。

〔4〕車載対応伝熱性TIMの新規開発

車載搭載で一般的に使用しているFIPG（Foamed in place gasket）は熱伝導率が約0.2 W/(m・K)～0.37 W/(m・K)と低いことから、熱伝導率が高いTIMを検討するため、熱流体解析によりデバイス放熱に必要な熱伝導率を1.2 W/(m・K)と決定した。また、一方のフィン先端と他方のベース板に生じた隙間は0.1 mmであり、これを埋めるために、TIMを塗布した後に形状を保持可能な粘度とチキソトローピー（注2）を満足し、かつ厳しい車載環境に耐えうる強度や伸び、耐候性を有する必要がある。特に、TIM硬化後の伸びに関しては、熱伝導性が良いほど伝熱性フィラーの混合量が増え伸び率が低下するため、車両に衝撃が加わった際、TIMの破断が生じやすくなる。よって、強度解析により衝撃負荷時のフィンの最大変形量を算出し、変形に耐えうる伸び条件を定義した。解析により、フィ

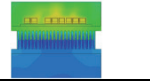
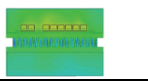
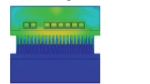
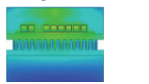
（注2）かき混ぜる、振り混ぜるなど外力を加えることで粘度が下がる性質。

ンの最大変形量が0.03 mmであるため、TIMの伸び条件を30 % (0.03 mm/0.1 mm) 以上とした。従来品では伸び率のワースト値が20 %と不足していたため、伸び率のワースト値を30 %に改善し、かつ熱伝導率1.2 W/(m・K)の放熱TIMを新規開発した。

以上の取り組みにより、単純統合比で放熱器体積を50 %低減させつつ、最大出力時の温度上昇を13.5 %低減 (71.9°C⇒62.2°C) させ、目標値65°C以下を満足した (第5表)。

第5表 放熱性能の比較

Table 5 Comparison of heat radiation performance

項目		単純統合構造	新規放熱構造
放熱器サイズ [L]		1.2	0.6
デバイス 温度上昇 ( $\Delta T$ ) [°C]	定常出力時	45.9 	40.5 
	最大出力時 (稼働時間 60秒)	71.9 	62.2 

#### 4. まとめ

統合省線化での小型高効率化に加え、小型高放熱構造の実現と、高回転・高効率の両立によるモータの小型軽量化によって、システム全体体積を従来比50 %低減、重量30 %低減、コスト18 %低減、効率90 %以上を達成し、小型EVの部品搭載スペース拡大による電池搭載容量の増加 (2.1 kWh) と効率改善で航続距離48 %増を実現した。今後、小型・高効率技術をさらに進化させ、小型EVの普及に貢献する。

#### 参考文献

- [1] 程塚正史, “中国における爆発的なEV普及と近距離・高精度交通サービスの可能性,” JRIレビュー, vol.6, no.45, pp.90-112, 2017.
- [2] 劉家敏, “電子商取引 (EC) と宅配物流の協調的発展の推進に関する意見,” みずほ総合研究所, <https://www.mizuho-ri.co.jp/publication/research/pdf/china-bri/cb180220.pdf>, 参照 Oct. 20, 2018.
- [3] 伊藤謹司 他, “トラブルをさけるための電子機器の熱対策設計 (第2版),” 日刊工業新聞社, 東京, 1992, p.292.

#### 執筆者紹介



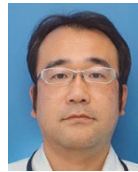
高橋 知宏 Tomohiro Takahashi  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 オートモーティブ開発本部  
Automotive R&D Div.,  
Automotive & Industrial Systems Company



石川 諒 Ryo Ishikawa  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 オートモーティブ開発本部  
Automotive R&D Div.,  
Automotive & Industrial Systems Company



冨永 麗司 Reiji Tominaga  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 オートモーティブ開発本部  
Automotive R&D Div.,  
Automotive & Industrial Systems Company



相澤 伸哉 Shinya Aizawa  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 オートモーティブ開発本部  
Automotive R&D Div.,  
Automotive & Industrial Systems Company



湊 純司 Junji Minato  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 オートモーティブ開発本部  
Automotive R&D Div.,  
Automotive & Industrial Systems Company