



## バスバーを最適化させるための先進的なアプリケーション

バスバーは一見シンプルに見えますが、バッテリーパックの内部だけでなく、EVの外側でも、今日の電気自動車に必要な大電力を支えることができる剛性の高い導体棒です。

バスバーは一見シンプルに見えますがそうではないのです。自動車メーカーがEVの生産量を増やすにつれて、特定の自動車用途に真に最適化されたバスバーソリューションを実現するには、製品やプロセスの設計に多くの工夫が必要であることが明らかになっています。

設計内容の如何によって、安全性、信頼性、コスト、製造可能性が左右されるのです。設計内容の選択は、車両の電気的および電子的アーキテクチャー全体に配慮することが必要になります。

## 製品設計の選択

バスバーは、EV で一般的に見られる大電力用途に最適です。OEM が EV バッテリーパックに初めてバスバーを使用したのは、バッテリーモジュールのインターコネク用としてでした。バスバーは、高速充電を可能にする充電ハーネスに不可欠な部品となりました。それ以外にもバスバーは、ドライブユニットとの接続、DC/DC コンバーター、ヒーターやエアコンプレッサーといった補助機器など、大電力が必要なあらゆる場所に適しています。

さらに、自動組み立てを使用する際には、バスバーの剛性がメリットとなります。柔軟なケーブルよりも堅固なバスバーのほうが、ロボットによる配置と接続が容易だからです。

それぞれの用途には固有の要件があり、すべての車両には独自の電氣的アーキテクチャーが採用されているので、それらを考慮する必要があります。それぞれの電氣的アーキテクチャーによってバスバーのサイズと形状、材料、柔軟性、端子方式が決まります。このような設計上の特性によって、バスバーの製造に用いられるプロセスが決まります。これらのプロセスは、設計プロセス全体を通じて考慮する必要があります。

## 素材の選択

設計上の決定の中で最も基本的なものの1つは、導体として銅とアルミニウム合金のどちらを使用するかというものです。どちらも優れた導電材料ですが、それぞれ固有の特性を持つので、バスバーを設計する際に考慮が必要です。

銅はアルミニウムよりも高温への耐性が優れています。たとえば、バッテリーパック内部に使用する材料は、最高 1,000°C の温度に耐えることを求められる場合があります。そのため、多くの OEM はパック内部の導体として銅を選択しています。

アルミニウムは、同じ電流容量で銅より 40% 軽いため、**軽量化**が重要な用途に適しています。ただし、同じ電流容量を実現するのに必要な断面積は、アルミニウムのほうが銅よりも 50% 大きくなります。アルミニウムは、軽量化は可能でもサイズが大きくなるため、主にスペースに余裕があるパッケージに用いられます。

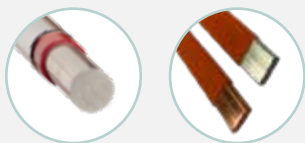
銅とアルミニウムのどちらを採用しても、OEM は、**リサイクル材料**を使用することで、製造過程での二酸化炭素排出量の削減を図ることができます。どちらの導体も特性が劣化することなく無限にリサイクル可能とみなせるので、リサイクル材料の使用は脱炭素化と循環経済への移行に重要な役割を果たします。

## 製品設計

バスバーの設計にあたっては、さまざまな要因を考慮する必要があります。

### 素材の選択

- 材料: 銅、アルミニウム
- 寸法: 幅、高さなど
- 形状: 円形、フラット



### 絶縁材料の選択

- 材料タイプ:
- 温度特性
- 耐久性
- 誘電特性
- 曲げ性能

### 複雑さと性能

- 剛性、柔軟性、またはハイブリッド
- シールドなしまたはシールドあり



### システムの最適化

- 相手方部品との適合性
- 断面積の最適化によるコストと重量の削減
- デバイス端子設計: 溶接、ろう付け、圧入、または直接接続

## サイズと形状

バスバーの断面は一般的には長方形ですが、円形断面のバスバーにもいくつかの利点があります。長方形断面のバスバーは曲げられる方向が限定されるのに対し、円形断面のバスバーはあらゆる方向に曲げられます。また、円形断面のほうが密閉やシールドの追加も容易です。

円形断面のバスバーはケーブルと同じように見えるかもしれませんが、実際には同等のヨリ線ケーブルと比べて断面積を 40% 小さくできます。ヨリ線の間有空隙が存在しないからです。また、自動組み立てに関するバスバーの利点も保持されています。

パッケージングが最も重要な用途では、従来型のフラット形状が多く用いられます。フラットなバスバーは、円形のケーブルに比べて長さを最大 70% 短くできるからです。



バスバーを設計する際の断面積の決定は、主に伝達する必要がある電流の大きさによって決まりますが、放熱特性が影響する場合もあります。大型のフラットなバスバーは、他の形状に比べて表面積が大きいため、熱を効果的に放散できます。そのため、高速充電時の [パッシブ冷却システム](#) として利用できます。

## 絶縁材料の選択

バスバーの絶縁材料を選択する際には、いくつかの要因を考慮する必要があります。多くの用途では、耐久性が高く、ひっかきや摩擦に耐える材料が求められます。また、高電圧電源と付近の金属の間の放電を防ぐため、優れた誘電特性を持つことも必要です。

製造プロセスの観点からは、次のような特性を持つ絶縁材料が求められます。

- バスバー導体によく接着し、曲げに耐えること。
- バスバーが最終形態に曲げられる前にバスバー導体上に成形加工できること。
- 曲げたときに大きなしわが寄ったり、跡が付いたり、破損したりしないこと。
- 除去したときに接触の妨げとなる残留物を接点領域に残さないこと。

上記のような特性は、製造プロセスの自動化への親和性と再現性を高めるために役立ちます。バスバーを曲げた後で、スリーブやテープを使って絶縁材料を追加する場合、プロセスに必要な手動作業が増えるからです。

自動車向けの高電圧用途に最近多く用いられるようになった絶縁材料として、架橋ポリオレフィン (XLPO) とナイロン PA 12 があります。これらはどちらも上記の基準を満たします。

しかし、特定の用途では、将来的にこれらの材料が対応できる温度よりもはるかに高い温度定格が求められる可能性があり、Aptiv はそのようなニーズに応えるために適切な材料の開発に最前線で取り組んでいます。たとえば、ナイロン PA 12 を改良して、より高い温度要件に対応できるようにしたものがあります。

## 柔軟性、シールド、密閉

バスバーの特徴のひとつに剛性がありますが、自動車に要求される振動や温度変化、熱伸縮などの過酷な環境では、剛性の高い設計は困難となる可能性があります。幸い、端子部分から離れた場所に柔軟性を導入することで、振動や熱膨張といった微細な運動による端子の損耗を防ぐことができます。また、製造公差により、バスバーが完全に剛体である場合、両端を接続することが困難な場合があります。

柔軟性を導入するにはいくつかの方法があります。一つは、バスバー部を複数の平らな導体層で挟んだものに置き換える方法です。もう一つは、導電材料の編組ストラップを断面に使用することです。

自動車の動作中に熱膨張などによってボルト締め位置にかかる力を減らすため、バスバーの設計には特殊なV字曲げが用いられることがあります。これらの設計は、組み立て時や組み立て時には固く固定し、組み立て後は柔軟なバスバーとしての特性を発揮するという利点があります。

また、車内のアクセスしにくい場所での組み立てを容易にするために、柔軟性を持たせることも必要です。たとえば、バスバーにヒンジを組み込むことで、組み立て中にバスバーの一部を回転させて、必要な場所への取り付けを可能にすることができます。

製造公差の問題に対処する方法の1つとして、スライド式端子を使用すれば、補正の際に力がかかるのを避けることができます。このタイプのコネクタは、ねじ止めすることで固定されて動かなくなります。

また、バスバーが車内の電子機器の近くを通る場合は、特に遮蔽を考慮する必要があります。電気導体からは電磁干渉 (EMI) が発生し、電圧が高いほど EMI も大きくなります。車両内の回路の大半は電子部品の近くを通るため、シールドは必須です。たとえば、シールドされない高電圧回路から発生する EMI は、AM ラジオの周波数に重大な影響を与えます。

さらに重要なこととして、人体への安全性の問題があります。たとえば、DC 高速充電回路から発生する電磁場 (EMF) は、ペースメーカーなどの機器に悪影響を与える可能性があります。DC 高速充電に常にシールドが必要というわけではありませんが、EMF に対する保護は設計の際に考慮する必要があります。

円形断面のバスバーやケーブルのほうがシールドは容易ですが、フラットモデル用の改良されたシールド方式も開発が進んでいます。シールドとしては、一般的に、編み込み金属被覆をバスバーの周囲に巻き付けて使用します。

水による金属の腐食を防ぐため、ほとんどの高電圧用途でシールドが必要です。ただし、電池パック内のバスバーについては、電池全体が電池収納部内に密閉されているため、別途密閉する必要はありません。

## 端子の選択

バスバーの端子にはいくつかの方式があり、選択にあたっては、コスト、用途、車両内の適切な場所にバスバーを取り付ける際の困難さといった要因が考慮されます。

溶接またはろう付け端子は、金属部品を取り付けるもので、バスバーの端部で複雑な配策を行う場合に適しています。たとえば、端部に 90° の曲げがあるような場合です。ただし、他の方式よりもコストは高くなります。圧入接点は、バスバーの端部に小さい金属部品を挿入するもので、費用が安く済み、パッケージングスペースが限られている場所に適しています。

また、限られた設置スペースでネジ止めができない場合に使用するプラグインコネクタという選択肢もあります。現在開発中のさらに高度な直接接続端子技術を使えば、組み立てが大幅に簡単になり、自動化も容易になる見込みです。

これらさまざまな端子方式では、ねじ込み式の場合もそれ以外の場合も、指や導線の接触を防ぐため、プラスチック製ハウジングによる絶縁が用いられます。

## 設計の最適化

もちろん、以上に述べた設計上の選択は、それぞれ単独で行われるわけではありません。車両全体のアーキテクチャの中で、すべての検討事項のバランスをとることが重要です。バスバーの設計は、周辺や端部付近のコンポーネントと適合しているでしょうか。それらのデバイスは、バスバーと組み合わせたときにどのように動作するでしょうか。

### 設計検証

設計プロセス全体を通じて、シミュレーションにより設計の動作を検証できます。

#### 熱シミュレーション

- 電氣的要件の定義
- 特定の電流負荷におけるシステムの熱反応のシミュレーション

#### 機械シミュレーション

- 指定した電流でのシステムの熱膨張
- バスバーの曲げシミュレーション



システム内のデバイスには多量の熱を発生するものもあり、そのような熱は、バスバーを含む周囲のコンポーネントに影響を与えます。同様に、バスバーから発生する熱も他のコンポーネントに影響する可能性があります。

設計の際に熱シミュレーションを行うことで、こういった相互作用が車両内でどのように起きるかを調べることができます。それにより、特定の負荷から発生する熱の量を知り、熱を除去する手段が必要かどうかを判断できます。機械シミュレーションを使えば、バスバーにどの程度の熱膨張が生じるかを調べられます。

バスバーの設計では、シミュレーションの結果から、断面、銅やアルミニウムの使用量、端子接続部の設計などの最適化が図られ、OEMの製品設計を確実なものにすることができます。

## プロセス設計の選択肢

バスバーの製造性は、その設計と同様に重要であり、優れた製品設計であれば、バスバーを作るために必要なプロセスや、車両に組み付けるために必要なプロセスを考慮する必要があります。検討すべきポイントはいくつかあります。

### 回路設計

あらゆる方向に曲げられるバスバーを設計することは可能でも、実際にそれを再現性のある方法で製造し、車両シャーシに取り付けるのはまったく別の話です。実現に手間や費用がかかりすぎる設計は、製造メーカーにとっては好ましくありません。

プロセス設計で3Dシミュレーションを使用することで、バスバーに特定の曲げを組み込むことの実現可能性を判断できます。その際に考慮される要因としては、曲げの数、使用可能な角度、曲げの間に必要な距離、必要な曲げ半径が挙げられます。

インテリジェントなツールやシミュレーションを使えば、コンポーネントのさまざまな要件を検証できます。たとえば、隣接コンポーネント間の安全距離、振動や高い機械的応力にさらされても不要な共振を生じない配策などです。シミュレーションは、バスバーを車両に取り付ける方法を決めるためにも役立ちます。たとえば、クリップ、カバー、チャンネルが必要な場所の判定などです。

こういった情報がプロセスエンジニアと製品エンジニアの間でスムーズに流れるようにすることで、対話的で協調的な開発が可能になり、高いパフォーマンスと製造可能性を兼ね備えた製品を実現できます。

### 曲げと被覆剥き

製品設計に含まれる曲げの作成に、どの程度高度な加工機が必要かは、曲げの複雑さと、設計がプログラムの実施中に变化する可能性があるかどうかによって決まります。

柔軟性が高く、さまざまな種類の曲げを処理できる加工機もありますが、特定の種類の曲げに特化した加工機よりも価格が高くなります。加工機の中には、90°の曲げの処理だけに最適化されているものも、用途に応じて設定を変更することで、たとえばある方向に30°、別の方向に40°といった曲げに対応できるものもあります。

ナイロン PA 12 などの一部の絶縁材料は、曲げに強く、しわがでにくいという特長があります。ただし、これらは導体への接着性がある意味で良すぎるため、絶縁材を除去して端子のためのクリーンな表面を得るには、レーザーを当てて絶縁材を気化させる必要があります。

これに対して、PVC や XLPO の場合は、ケーブルと同様に機械的な方法で、すなわち絶縁材に切れ目を入れてはぎ取ることで、バスバー端部から絶縁材を除去できます。ただし、これらの絶縁材料では曲げ部分にしわが生じることがあります。

もう1つの考慮事項は、曲げと被覆除去を同じ加工機で行うかどうかです。たとえば、レーザーによる被覆除去には時間がかかるので、その機能を別の加工機に移したほうが効率を上げられる可能性があります。一方、曲げと被覆除去を同じ加工機で行えば、被覆を除去する領域に対して形状と位置に関する柔軟性が高まります。

### プロセス設計

製品設計と同様に、製造プロセスを最適化する方法は複数存在します。

#### 回路設計

- 3D 演算による設計支援
- 回路設計: カバー、クリップ、チャンネル



#### 曲げ性と被覆除去

- 曲げ方法の選択
- 曲げステップの最適化
- 被覆除去方法の選択
- 曲げと被覆除去の統合



#### 接続プロセス

- 対極を接続する工程の特定 (溶接、ろう付け、プレス、組立)
- めっきプロセス (必要な場合)



### システムの考慮

EV 用のバスバーは、単に既成品を買ってきて必要な場所に取り付けられればよいというものではありません。バスバーは EV の電気的アーキテクチャーの重要な要素であり、高度なコンピューターシミュレーションテクノロジーや製造技術を使用して、特定の車両の固有の要件に応じた高度なカスタマイズと最適化を行う必要があります。

そのために、バスバーを設計するエンジニアには、さまざまな分野についての深い理解が必要とされます。EV の配電システム全体と、それが車両内の他のすべてのコンポーネントに与える影響を考慮し、設計の選択が性能、コスト、製造性にどのように影響するかを理解する必要があります。

同社独自の車両の”脳と神経系”をつなぐソリューションポートフォリオを提供する唯一の企業である Aptiv は、そのような包括的な視点でソリューションを提供してきた豊富な歴史を持っています。最近の Intercable Automotive Solutions の買収により、高電圧バスバーに関する同社の業界をリードするイノベーションを、Aptiv の設計とプロセスに組み込めるようになりました。EV 市場の成長が続くにつれて、これらの機能は自動車メーカーによる製品の差別化にさらに重要な役割を果たすはずです。

## 著者について



**Andrew Bohan**

Aptiv 車両電動化システム部門バスバー製品ラインエンジニア

Andrew Bohan は、Aptiv のグローバルバスバーチームで開発を主導、調整し、急速に成長する変化の激しいバスバー市場でのビジネスの遂行をサポートしています。Andrew は 2016 年に Aptiv に入社し、アプリケーションエンジニア、製品エンジニア、電気自動車システムエンジニアを務めてきました。



**Daniel Gutwenger**

Intercable Automotive Solutions 製品開発責任者

Daniel Gutwenger は、Intercable Automotive Solutions で製品の開発、設計、シミュレーションを主導しています。対象となる製品には、ケーブルラグ、バッテリー端子、プレヒューズボックスなどのさまざまなプラスチック、金属、およびハイブリッド部品に加えて、バッテリー内部および外部で用いられる電力分配用の高電圧バスバーや、電気自動車のバッテリー管理用のハードウェアコンポーネントが含まれます。Daniel は同社に入社して 6 年目で、工学学士号と経営学修士号を持ち、世界の有名自動車ブランド向けの高パフォーマンス、高精度のソリューションをチームとともに開発しています。

詳細については、[APTIV.COM/VCS](https://www.aptiv.com/vcs) をご覧ください →