

環境対応自動車を支える 次世代インバータ技術

Next-generation Inverter Technology Supporting Environmentally Conscious Vehicle

中津 欣也
Nakatsu Kinya
西原 淳夫
Nishihara Atsuo

鈴木 英世
Suzuki Hideyo
佐々木 康二
Sasaki Koji

持続可能な社会を実現するためにCO₂排出量削減が求められており、電力事業、産業、民生や輸送事業など多くの事業部門で省エネルギー化を促進している。特に、輸送関連部門では、内燃機関を用いた従来の自動車からパワーエレクトロニクスを活用した環境対応自動車が必要不可欠である。パワーエレクトロニクスを支えるコンポーネントとしては、主にインバータ、電池、モータなどがあり、日立グループは各コンポーネントでさらなる小型高効率化を実現する要素技術の開発を推進している。

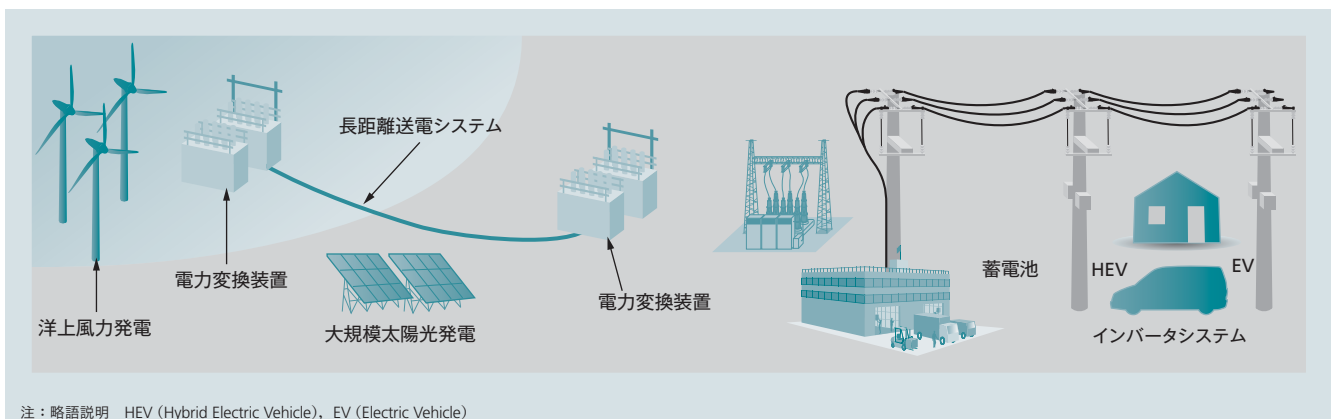
1. はじめに

持続可能な社会に向けてCO₂排出量削減を進める中、輸送部門では、従来の内燃機関自動車からHEV (Hybrid Electric Vehicle：ハイブリッド電気自動車)、EV (Electric Vehicle：電気自動車)へ移行することで省エネルギー化やCO₂排出量削減を図っている。一方、一次エネルギーから電力を作り出す発電部門では、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーによる電力供給量の拡大に向けて大規模発電システムの構築を急いでいる。このような、再

生可能でクリーンな一次エネルギーを輸送・産業・民生分野で効率よく活用できるスマートシティを構築するには、小型で高効率なインバータシステムと余剰電力や回生エネルギーを蓄えて必要なときに利用できる電池システムが必要となる(図1参照)。

特にインバータシステムでは、電池などに蓄えられた直流電力を交流電力に変換し、変換する際に車速などシステムの制御に必要な周波数を作り出し、モータの回転数、トルクや消費する電力を制御し、車両の加減速を行うことができる。このようなHEVやEVの電気駆動システムに求められる性能は、車両搭載性を重視した小型化、走行距離を延ばす高効率化、運動性能を高める高出力化、厳しい車載環境下での高信頼化などが挙げられる^{1), 2)}。

日立グループはこのようなささまざまな要求に対応するため、電力、産業、民生などの多くの分野で培った実装・解析技術を駆使し、直接水冷方式を2007年に開発して、インバータの小型化と高性能化を実現した。さらに開発を進めて、冷却フィン进行全面液浸した直接水冷型両面冷却方式



注：略語説明 HEV (Hybrid Electric Vehicle), EV (Electric Vehicle)

図1 | 再生可能エネルギーを利用したインバータシステム

再生可能でクリーンな一次エネルギーを輸送・産業・民生分野で効率よく活用できるスマートシティでは、小型で高効率なインバータシステムと余剰電力や回生エネルギーを蓄えられる電池システムが必要となる。

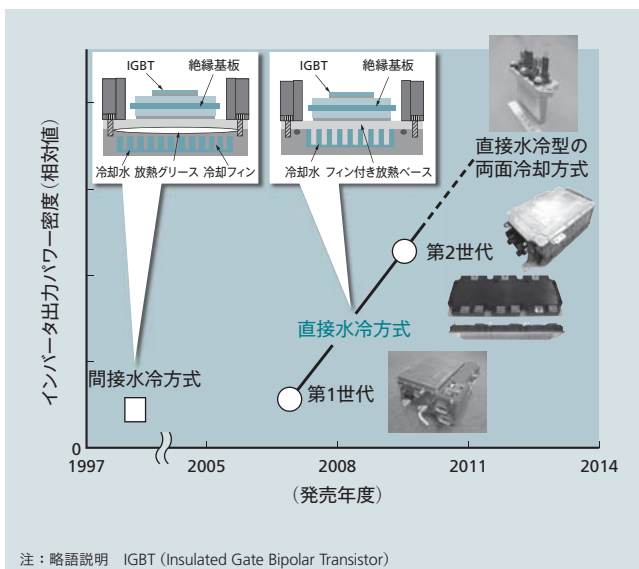


図2 | HEV, EV向けインバータの開発ロードマップ

車載に必要なさまざまな要求に対応するため、電力、産業、民生など多くの分野で培った実装・解析技術を駆使し、直接水冷方式を開発して、小型化、高性能化を実現してきている。

とすることで、電力変換装置のさらなる小型化も進めている^{3), 4)} (図2参照)。

ここでは、電力制御を行うインバータ装置の小型高効率化に必要な回路実装、冷却や耐振動性など高い信頼性を実現する解析設計技術について述べる。

2. 次世代インバータ

インバータの小型高性能化には、コンパクトで自由度の高い電力配線、パワーモジュールの低損失化や冷却器の高性能化、さらに制御用計算機が搭載された配線基板などの高信頼化が課題である。以下に、次世代インバータの電力配線構造と高速で高効率なスイッチングを実現するパワーモジュールの実装技術について述べる。

2.1 コンパクトな電力配線でインバータを小型化

一般にHEVシステムのインバータは、エンジンルームの限られたスペースに搭載されることが多く、バッテリーやモータとの接続性の向上のためにインバータ内部の電力ルートが複雑化し、筐(きょう)体の大型化を招いていた。求められる最適な電力配線は、モータ配線とバッテリー配線の位置関係を容易に変えられ、変換損失やノイズの影響を低減できる構造である(図3参照)。

開発した第2世代インバータの電力ルートの模式図を同図(a)に示す。開発したインバータの特長は、中央に冷却水路、底部にキャパシタ、上部にパワーモジュールの三つのエリアを構成し、キャパシタエリアにバッテリー配線との接続自由度の高い構造を採用した点にある。この構成により、電力は点線で示すように筐体内をコンパクトに流れ、

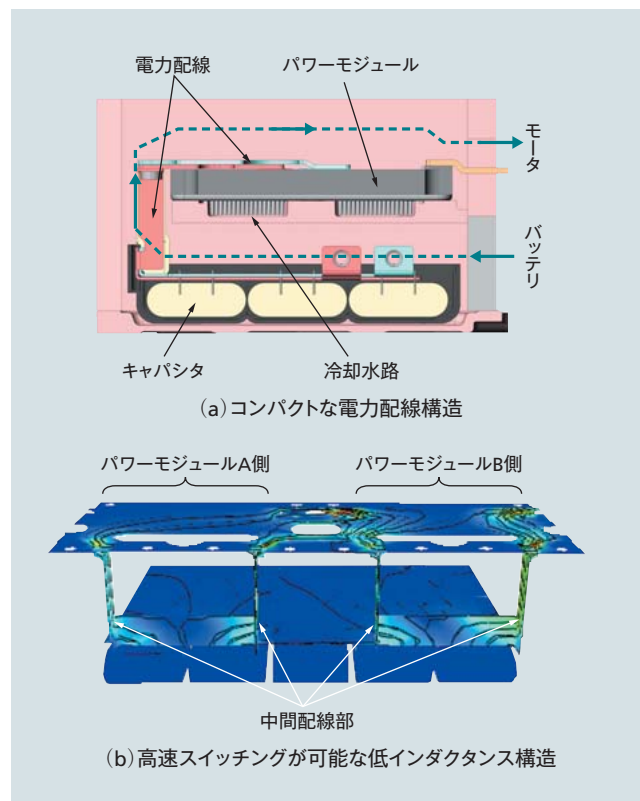


図3 | 次世代インバータの電力配線構造と低インダクタンス構造

冷却水路を中央に、インバータを三つのエリアで構成し、電力を筐(きょう)体内でコンパクトに流すことで、配線エリアを大幅に削減し、外部接続の自由度を改善するとともに、電流密度分布を中間配線部で制御してインダクタンスの低減を実現した。

配線エリアを大幅に削減しながらもバッテリー配線の接続自由度とインバータの出力パワー密度の向上で、従来比約3倍を超える小型高出力化を達成した。

2.2 高速スイッチングを実現するパワーモジュール

インバータの損失を低減するには、パワーモジュールの導通損失と過渡的な電圧電流変化で生じるスイッチング損失を低減する必要がある。このスイッチング損失を低減するには、高速スイッチングが可能な電力配線の低インダクタンス化が必要である⁵⁾。一般に、平行平板に逆位相の電流を流すことで磁束が相殺され、インダクタンスが低減できるが、1組の平行平板でキャパシタとパワーモジュールを接続すると筐体の大型化を招いてしまう。そこで、第2世代インバータでは、小型化のためにキャパシタエリアとパワーモジュールエリアに電力配線を分割し、そのエリア間を小型の平行平板で構成した中間配線4組で接続し、その設置間隔を十分にとることでパワーモジュールA側、B側までのインダクタンスを低減した。電力配線の電流分布解析結果を図3(b)に示す。中間配線の効果で電流は、各エリアの電力配線全域に広がり、インダクタンスが低減され、パワーモジュールの損失低減とノイズの原因となるサージ電圧を抑制できることを確認した。

3. ピンフィンヒートシンクの最適設計技術

自動車に搭載される車載インバータの多くは、パワー半導体の温度を下げ高信頼化するために、発生した熱を冷却水で車両前方に用意したラジエータへ輸送し、熱を空中に放出している。特に、小型高性能化が必要なHEV/EV向けインバータでは、その体積に比べてパワーモジュールからの発熱が産業用途などのシステムよりも大きいため、パワーモジュールから熱を取り去る冷却システムに高い性能が要求される。そこで、冷却水に対して熱伝達性が優れたピン形状のフィンを用いた冷却システムに高い性能が要求される。そこで、冷却水に対して熱伝達性が優れたピン形状のフィンを用いた冷却システムに高い性能が要求される。そこで、冷却水に対して熱伝達性が優れたピン形状のフィンを用いた冷却システムに高い性能が要求される。

このピンフィン型放熱ベースの課題は、車両の冷却システム全体の効率化であり、フィン部の高い熱伝達率と同時に低い圧力損失を達成することである。ピンフィンの性能は、主にフィンの形状に依存し、その形状パラメータを用いて熱伝達率と圧力損失の仕様を同時に満足する形状最適化が必要である。従来の設計手法では、非常に多くの組み合わせを検証する必要があり、多大な工数がかかっていた。そこで、多目的最適化技術を用いてピンフィン型放熱ベースの高性能化を図った。

多目的最適化手法を適用するには、目的関数を設定する必要がある。パワーモジュールでは、その目的関数として熱抵抗 (R) と圧力損失 (P) が適切である。また設計変数となるピンフィンの形状パラメータは、高さをH、直径をD、平行方向のピッチをX/D、垂直方向のピッチをY/Dの4変数とした (図4参照)。この際、フィン高さ $H < 8 \text{ mm}$ 、フィン間最小隙間 $> 1 \text{ mm}$ の制限条件を設けた。今回は、上記の制限条件の下で設計変数を変化させ、目的関数RとPが同時に満足する形状を探索した。

探索では、100組の組み合わせを解析領域全体で100回繰り返す遺伝的アルゴリズムを用いた。自動計算の結果、従来の設計手法によるヒートシンクと同等の熱抵抗 (R) で圧力損失 (P) を約36%低減できる解を導くことができた。この手法は、冷却システムの高性能化や仕様変更など

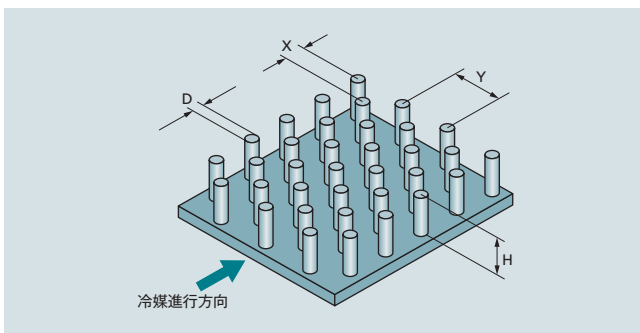


図4 | 冷却進行方向に対するヒートシンクの各設計変数の定義
ピン高さをH、直径をD、流れに平行・垂直方向のピッチをおのおのX、Yと定義する。

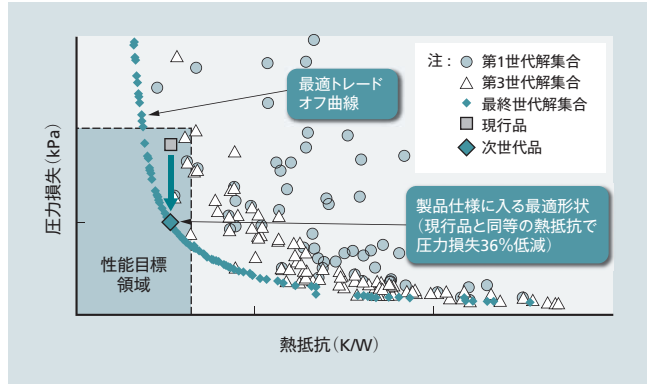


図5 | 多目的最適化による計算結果

トレードオフ関係にある圧力損失と熱抵抗の最小化に対し、遺伝的アルゴリズムを用いて解析した。図中のプロットは、別々の形状の特性を示している。第1世代は、全体に解が点在していたが、第3世代になるとある程度左下へ集中が始まり、さらに自然淘汰 (とう) 汰を繰り返して最終世代まで解析を進めると、生き残った解の集合が最適トレードオフ曲線として得られる。

への迅速な対応など、設計期間の短縮に大きく貢献している (図5参照)。

4. 耐振動信頼性評価技術

HEV/EV向けインバータには、厳しい車載環境下で高い信頼性が求められる。しかしながら限られた車内空間を有効利用するために、大きな振動源であるエンジンやトランスミッションの近傍にインバータなどの電気部品を設置する必要がある。このためインバータの耐振動環境性能の課題は、限られた実装空間の中で電気や熱などの課題を解決しながらも振動信頼性を確保することである。インバータに加わる振動は大きく分けて、(1) エンジンやトランスミッションなどの車両に搭載された大型部品から伝えられる、主に正弦波を含む振動と、(2) ロードノイズとして伝えられる、主にランダム波を含む振動の二つがある。耐振動信頼性向上には、この両者の影響を考慮した評価が必要である。自動車メーカー各社では、自動車部品の振動試験規格であるISO16750-3やJIS-D1601をベースにラン

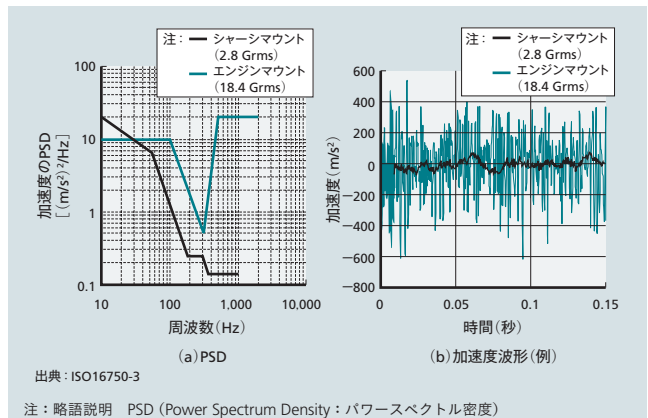


図6 | ランダム波の周波数ごとの強さを表すPSDと実際の加速度波形の例
インバータの振動環境は、インバータ搭載位置、エンジンの有無や種類、サスペンションの性能などによって大きく異なる。

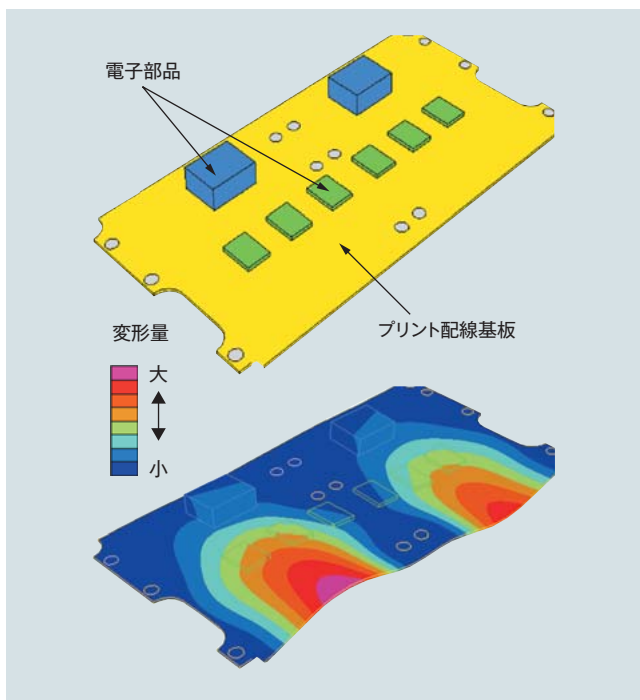


図7 | インバータ搭載プリント基板の振動解析

3D-CAD (3-dimensional Computer-aided Design) ソフトウェアと連携し、形状作成から解析実行、評価から形状へのフィードバックという工程が設計者の机上で可能となる。

ダム加振試験を設定しているケースが多い (図6参照)。

さまざまなランダム加振条件に対応するために、日立グループは従来から鉄道機器用や原子力関連機器用に開発を進めてきた振動シミュレーション技術をベースにし、解析主導によるランダム加振シミュレーションと信頼性評価技術を開発している (図7参照)。また、3D-CAD (3-dimensional Computer-aided Design) ソフトウェアと連携することにより、3D-CADでの形状変更からシミュレータによる信頼性評価および3D-CAD形状へのフィードバック、という一連の工程を設計者の机上で行うことが可能となっており、多様な振動条件に対応してインバータの耐振動信頼性を評価することができる。シミュレーション結果から得られた各部材の共振周波数や変形、応力の周波数特性から耐振動信頼性を評価し、無用な共振を抑えるための適正な固定箇所の設計や、応力低減のための構造適性化設計、防振ゴムなどを用いた免振設計にフィードバックしている。

5. おわりに

ここでは、環境対応自動車の主要構成要素であるインバータについて、日立グループの持つ電気、熱、振動などの解析技術を駆使した小型高信頼化について述べた。

今後、これら解析技術をさらに改良することで、持続可能な社会に向け、システム全体の環境負荷の低減や性能向上に役立つパワーエレクトロニクスシステムを提供していく。

参考文献

- 1) 浜田, 外: 低燃費で地球に優しく力強いHEVシステムの開発, 日立評論, 86, 5, 343~346 (2004.5)
- 2) 吉原, 外: ハイブリッド電気自動車用パワートレインの電動化技術開発, 日立評論, 91, 10, 768~771 (2009.10)
- 3) 井出, 外: グリーンモビリティを支えるパワーエレクトロニクスコンポーネント技術, 日立評論, 93, 5-6, 412~415 (2011.5-6)
- 4) 中津, 外: 電気自動車, ハイブリッド自動車用インバータに搭載されるパワーモジュールの床面積を半減する技術を開発, 日立評論, 94, 1, 129 (2012.1)
- 5) K. Nakatsu, et al.: A Super Compact Inverter with a New Concept Power Module, PCIM JAP, pp. 87-92 (1998)

執筆者紹介



中津 欣也

1994年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター モータシステム研究部 所属
現在, 車載インバータ, 産業用インバータ, パワーモジュールの研究開発に従事
電気学会会員, 自動車技術会会員, IEEE会員



鈴木 英世

2005年日立製作所入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在, 車載インバータの構造設計に従事
自動車技術会会員



西原 淳夫

1989年日立製作所入社, 日立研究所 機械研究センター 高度設計シミュレーション研究部 所属
現在, 車載インバータ, パワーモジュールの研究開発に従事
日本機械学会会員, 日本伝熱学会会員



佐々木 康二

1993年日立製作所入社, 日立研究所 機械研究センター 構造信頼性研究部 所属
現在, 電子機器の構造信頼性評価技術の研究開発に従事
日本機械学会会員