

Civic Hybrid 用小型インテリジェントパワーユニットの開発

Development of Intelligent Power Unit for Civic Hybrid

相 高 和 彦*
Kazuhiko AITAKA

細 田 正 晴*
Masaharu HOSODA

野 村 拓 哉*
Takuya NOMURA

要 旨

Civic Hybrid 用 Honda IMA システムのインテリジェントパワーユニット(IPU)は、従来型と比較し、各コンポーネントの更なる軽量・コンパクト化と高効率化を目標とし開発を行った。エネルギー損失を低減するために、IGBTチップの微細化によりインバータの効率を高め、ソフトスイッチング技術を採用して 12V DC-DC コンバータの効率を高め、また電極と集電構造の改良により IMA バッテリーの内部抵抗を低減した。これらの改良により構成機器の発熱量が削減されたため、パワーコントロールユニットとバッテリーで各々持っていた冷却システムの統合が可能となり、冷却経路を従来の 2 経路から 1 経路に集約することができ、従来型 IPU の体積に対し 42%の削減を実現した。

ABSTRACT

The Intelligent Power Unit (IPU) utilized in Honda's Civic Hybrid Integrated Motor Assist (IMA) system was developed with the aim of making every component lighter, more compact and more efficient than those in the former model. To reduce energy loss, inverter efficiency was increased by fine patterning of the Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) chips, 12V DC-DC converter efficiency was increased by utilizing soft-switching, and the internal resistance of the IMA battery was lowered by modifying the electrodes and the current collecting structure. These improvements reduced the amount of heat generated by the unit components and made it possible to combine the previously separate PCU and battery cooling systems into a single system. Consolidation of these two cooling circuits into one has reduced the volume of the newly developed IPU by 42% compared to the former model.

まえがき

近年の自動車産業における重要な課題として、自動車の低燃費化による CO₂ 排出量削減が挙げられるが、その一つの回答として、エンジンと電気モータを組み合わせたハイブリッドシステムに注目が集まっており、ホンダでも 1999 年より軽量、コンパクトな IMA (Integrated Motor Assist) システムを搭載した Insight を開発し販売している。今回はハイブリッドカーの更なる普及を目指し昨年発売した Civic Hybrid の IMA システム用 IPU (Intelligent Power Unit) の開発について、4 ドアセダンに搭載可能とするための更なる軽量コンパクト化を達成した各コンポーネントの開発技術を紹介する。

*栃木研究所

1. Civic Hybrid 用 IPU 開発目標

シビック 4 ドアセダンに搭載する IPU は、従来セダンの居住性やトランクスペースなどの使い勝手を確保しつつ、IMA システムを搭載することを目的として開発を行った。基本コンセプトを、「5 人乗り & 5 人対応トランクスペース確保」とし、それらを達成するために IPU 体積を Insight に対し 4 割削減し IPU をリアシート後方にコンパクトに収納することを目標とした。

1.1. IPU 小型化

Insight に搭載した IPU を Fig. 1 に示す。従来型 IPU 体積は 138L であり、その内訳は、

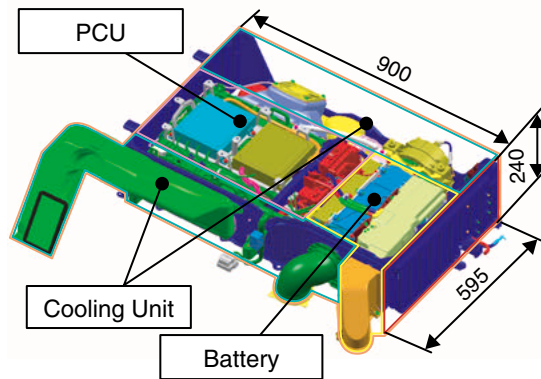


Fig. 1 Dimensions of Insight IPU

- ・パワーコントロールユニット(PCU) 33L(24%)
- ・バッテリー 43L(31%)
- ・冷却系 62L(45%)

である。

Civic Hybrid の IPU 体積の目標を 80L とし、各構成機器の小型化目標を、

- ・PCU 20%
- ・バッテリー 30%
- ・冷却系 60%

とした。

1.2. 冷却系の統合

特に冷却系の小型化については従来 2 系統あった冷却経路を統合し、バッテリーと PCU 冷却を一体化することを検討した。バッテリー管理温度を考慮すると、バッテリー冷却の冷媒となる吸入空気は常温である必要があるため、Civic Hybrid では冷却吸排気を車内より行なうことを前提とした。また冷却風量については、車内吸排気に伴う空調負荷の増大や車内騒音等を考慮して冷却風量目標を 90m³/hr 以下と設定した。Insight での冷却系要求風量は、

- ・インバータ 138m³/hr
- ・12V DC-DC コンバータ 120m³/hr
- ・バッテリー 60m³/hr

であり、冷却系の統合にはインバータ、12V DC-DC コンバータの要求風量を 90m³/hr 以下に低減することが必要である。従来型では、PCU 冷却風を車外から吸入しているため炎天下等の高温環境を考慮すると吸気温度を高く想定する必要があったが、冷却系統合により車内からの吸気となるため冷却吸気温度の低下が期待できる、つまり風量の低減が可能となる。併せて PCU 各コンポーネントの効率向上による発熱量削減も当然必要である。以上、吸気温度を下げ機器効率も上げることで従来型の冷却系 2 系統を一つに統合できないか検討した。

1.3. アシスト・回生電力増加への対応

さらに Insight からの変化点として車両重量増加とエンジンの気筒休止システム CIS(Cylinder Idling System)追加によるアシスト・回生電力 30%増加に対応する必要がある、この面からも IPU 各構成機器の効率向上が求められ、今回の開発の重要な課題となった。特にバッテリーの入出力増加による発熱が課題となるため、その対応として先述の冷却系統合での目標最大風量を守りつつ、従来型に対し冷却風量 50%増とバッテリー内部抵抗 20%低減による発熱量削減で対応することとした。

2. パワーコントロールユニット(PCU)

リアシート背面への IPU 搭載を実現するためには、PCU の約 20%小型化と、インバータ及び 12V DC-DC コンバータの損失低減が必要となった。これらの技術課題を解決するために行った内容を下記に示す。

- ・インバータとブリドライバの一体化による小型化
- ・インバータ内 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)チップの微細化による損失低減
- ・コンデンサの損失低減および高放熱構造による小型化
- ・12V DC-DC コンバータ制御のソフトスイッチング方式採用による小型、低損失化

以上の技術開発の結果、PCU 体積は Insight の 33L に対し 26.8L となり 20%の小型化を達成した。Fig. 2 に Civic Hybrid の PCU を示す。

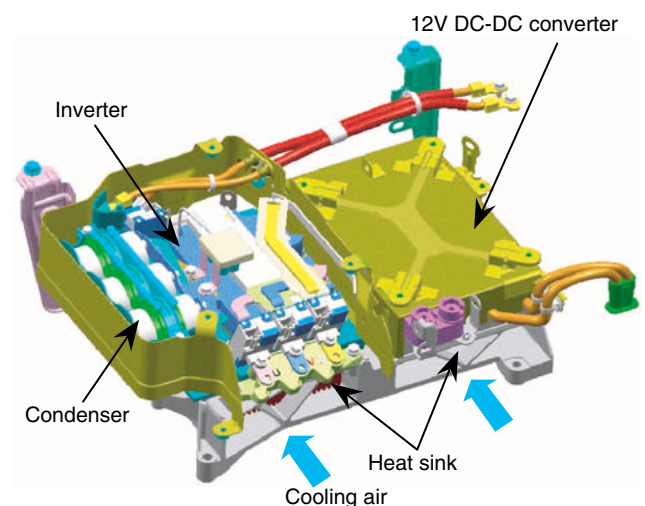


Fig. 2 Power Control Unit

2.1. インバータ

小型軽量化と損失低減を達成するために、インバータの構成機器それぞれに新技術を導入し開発を行った。以下にその詳細を説明する。

2.1.1. インバータとブリドライバの一体化

モータ駆動を制御するインバータの改良点を以下に示す。

- 1) IGBT 素子の駆動回路のカスタム IC 化
- 2) 高性能マイクロコンピュータ搭載による保護機能のソフト処理
- 3) モータ ECU 通信をシリアル通信とするなどインターフェイス回路の簡略化

以上の新技术により従来型に対し39%の小型化, 28%の軽量化を達成した。Fig. 3 に Insight と Civic Hybrid のインバータユニットを示す。

また従来は IGBT チップ近傍に設けたサーミスタにより温度を検出しチップ過熱保護を行っていたが, 本開発品では IGBT チップ上に温度センサを設けることにより温度検出応答性を高めている。

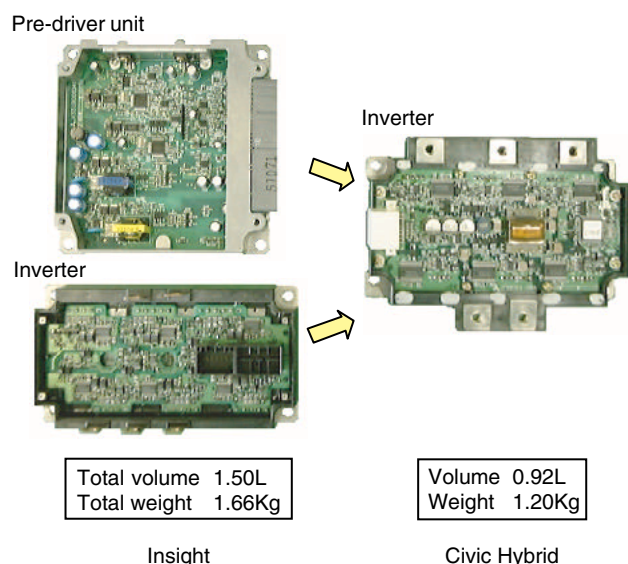


Fig. 3 Inverter unit

2.1.2. IGBT チップ微細化による損失低減

インバータのパワー素子である IGBT チップのセルパターンを Fig. 4 に示す。従来型よりもセルパターンを細かくすることにより同一チップ面積へ約3倍のセルを実装し, 単位面積当たりのチャネル抵抗 R_{ch} を低減した。よって IGBT のオン電圧が低下し, 従来比最大 25%の損失低減となった。

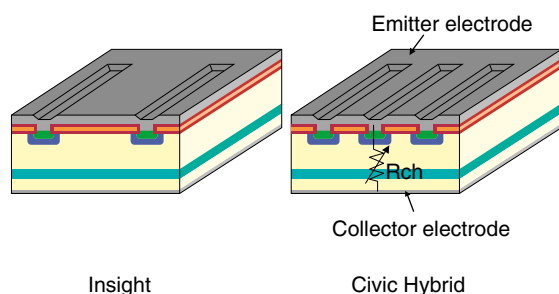


Fig. 4 Model of IGBT fine patterning

2.1.3. コンデンサ小型化

従来の電解コンデンサ素子は樹脂で固定され, 耐振動性の確保と放熱を行っていたが, 本開発品においては素子底面を直接アルミニウムケースに接触させることで素子の放熱を促進し(Fig. 5), 放熱性が従来に比べ 20%向上している。また電解液および電極箔のエッチング改良による抵抗低減により素子特性の ESR(Equivalent series resistor)が改善され, 素子発熱は従来に比べ18%減少した。以上の改良により従来型のコンデンサに対し 30%の小型化と 27%の軽量化を達成できた。

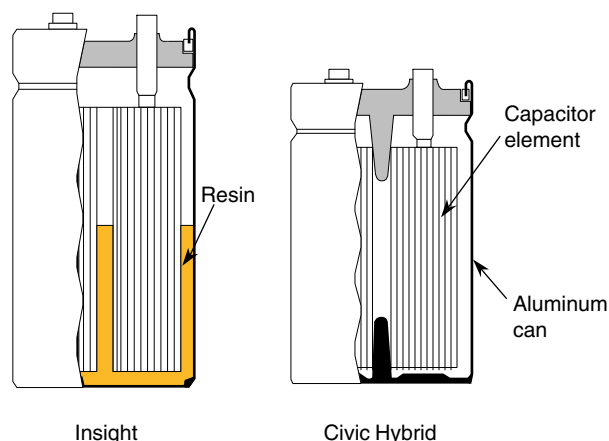


Fig. 5 Capacitor structure

2.1.4. インバータ効率の向上

上記技術により, インバータの効率はモータ駆動条件全域において向上し, 損失が低減された。Fig. 6にモータ回転数に対するインバータ効率のグラフを示す。

またモータの回転数, トルクに対するインバータの効率マップを Fig. 7 に示す。このグラフ上に実際に走行した際のモータ回転数とトルクのサンプリングデータをプロットすると, 実走行においてはインバータの高効率領域が主に使われていることがわかり, 効率向上によるエネルギー損失低減が燃費向上にも寄与できている。

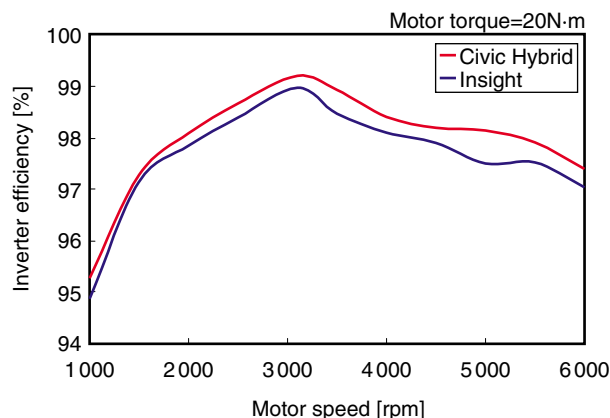


Fig. 6 Inverter efficiency

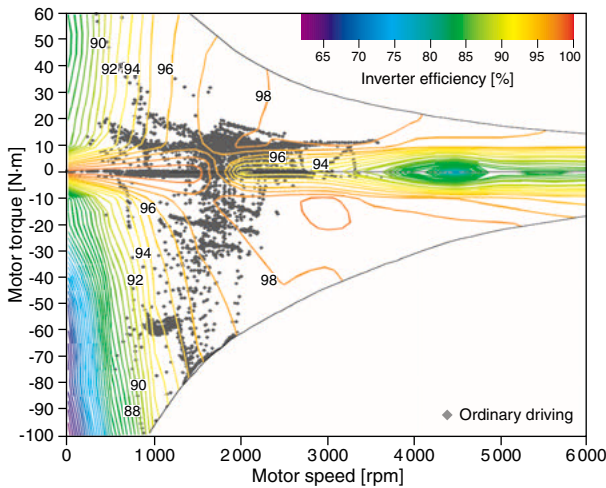


Fig. 7 Inverter efficiency map

2.2. 12V DC-DC コンバータ

12V DC-DCコンバータは従来のハードスイッチング方式に対し、ソフトスイッチング方式を採用し損失低減を図った。Fig. 8 に動作概念図を示す。

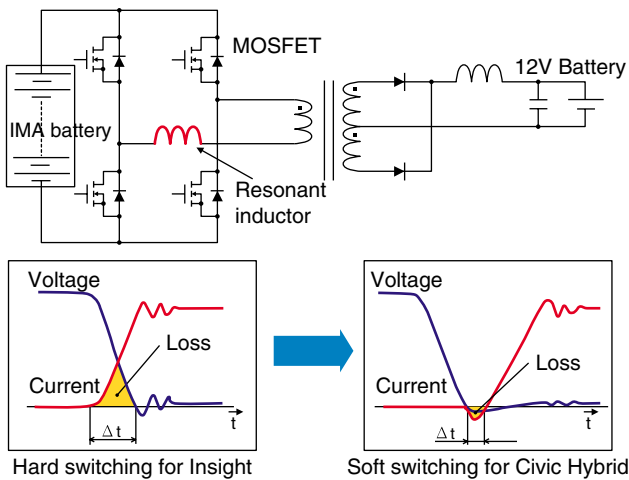


Fig. 8 12V DC-DC converter circuit

トランスを駆動する MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) のスイッチング動作において、MOSFET オン時に IMA バッテリから MOSFET を通してトランスに流れる電流経路に共振インダクタを追加し、スイッチングタイミングを制御することにより、MOSFET ドレインソース間電圧とドレイン電流のオーバーラップ時間を短縮し、スイッチング損失を低減した。Fig. 9 に示すように、上記ソフトスイッチング回路の採用により従来型に比較して平均 2% の効率向上が実現できた。またこの技術に伴い、コンバータ内部品の簡素化も可能となり Insight に対し 22% の小型化、9% の軽量化を達成した。

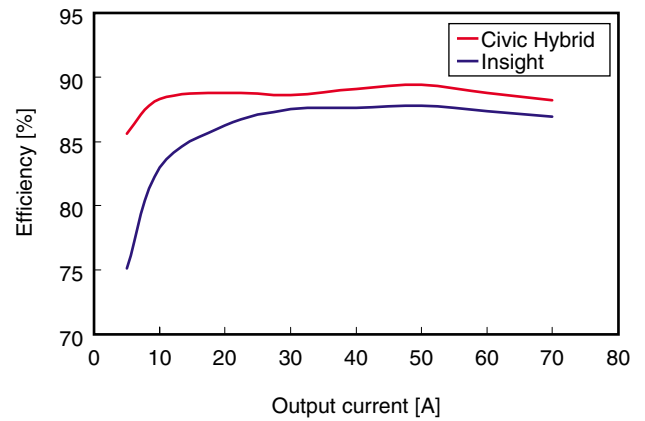


Fig. 9 12V DC-DC converter efficiency

IMA バッテリからの入力電圧と 12V バッテリへの出力電流に対する 12V DC-DC コンバータの効率マップを Fig. 10 に示す。このグラフ上に示した実走行にて使用される領域の効率を高める改良を行い、実使用時の損失を低減した。したがって Insight に対し少ない風量での冷却が可能となり、また消費電力も低減されたため、機器の小型化と燃費向上を達成した。

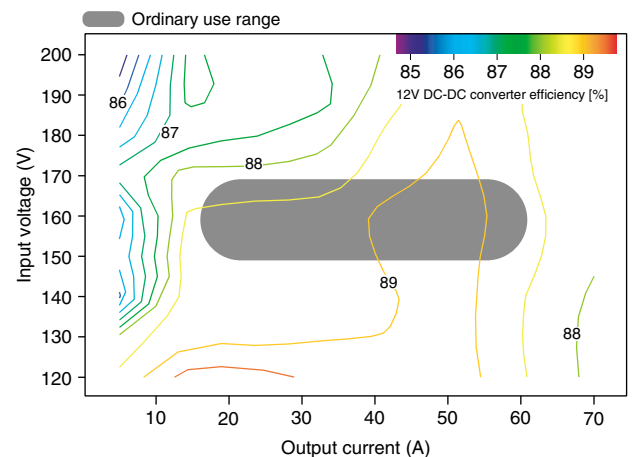


Fig. 10 12V DC-DC converter efficiency map

3. IMA バッテリ

Insight からの車両の変化点として、車重増加とエンジンの気筒休止システム (CIS) があり、回生時のエネルギーが増加することとなった。それらによるアシスト・回生電力の増加、つまり走行中のバッテリ平均入出力が大きくなりバッテリ発熱量が増大することが予想された。そのために、

- 1) バッテリモジュール内部抵抗を約 20% 低減
 - 2) バッテリ冷却風量を従来型より 50% 増加
- を対策として検討した。

Insight と Civic Hybrid で実際に走行したときの発熱量と熱収支を Fig. 11 に示す。このように発熱は Insight 比

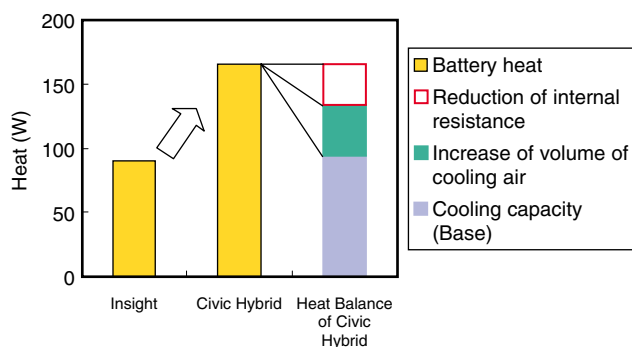


Fig. 11 Battery heat balance

1.8 倍になったがバッテリー内部抵抗 20%低減と冷却風量 50 %増により従来型と同等のバッテリー温度上昇に抑えることが可能となった。

3.1. バッテリーモジュール

バッテリーモジュールは Civic Hybrid 専用として改良を行ない、極板及び集電部機構の見直し、特に集電板の形状を変更することにより内部抵抗を低減した。Fig. 13に集電板の形状の比較を示す。

集電板の形状変更により、極板との溶接点数の増加、集電板の電流密度の平準化がなされた。その他電池内部の改良と合わせ、抵抗を Insight 搭載品よりも 19%低減した。



Fig. 12 IMA battery module

	Insight	Civic Hybrid
Positive current collector		
Negative current collector		
Number of welding points	84	118
Internal resistance	21m Ω	17m Ω (-19%)

Fig. 13 Current collecting plate

3.2. IMA バッテリーボックス

軽量化と小型化を目的とし、バッテリーボックス構成部品の見直しを行った。

- 1) バッテリーボックス廻りの付属部品(バッテリーECU, ハーネス等)配置を最適化することにより、ボックスユニットを小型化
- 2) 従来型同等以上のバッテリーボックス強度を確保し、締結部の形状を Civic Hybrid として最適設計し小型軽量化以上の結果、Insightのバッテリーボックスと比較しボックス体積で 29.5%, 重量で 5.6%の小型軽量化が達成された。

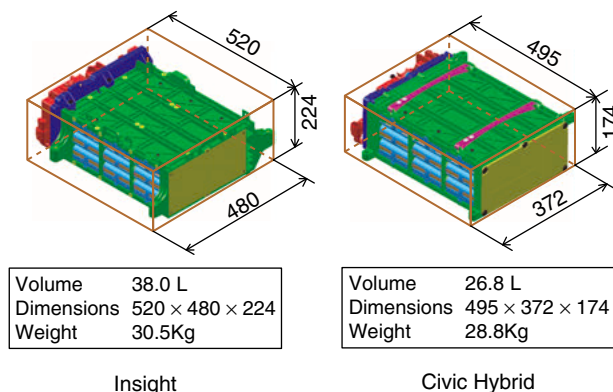


Fig. 14 IMA battery box

4. 冷却システムの統合

Fig. 15 に Insight の IPU とその冷却経路を示す。従来型では冷却経路が PCU 系とバッテリー系の 2 つに分かれていた。PCU 系は冷却風を車外から吸気し、インバータ及び 12V DC-DC コンバータを冷却して車室外に排気する構成であり、バッテリー系は車室内から吸気してバッテリーを冷却し、車室内に排気する構成であった。冷却システムは IPU 全体に対し約 45%と大きな体積を占めている。これに対し Civic Hybrid では冷却システムの 60%小型化を達成するために冷却経路の一系統化の検討を行った。

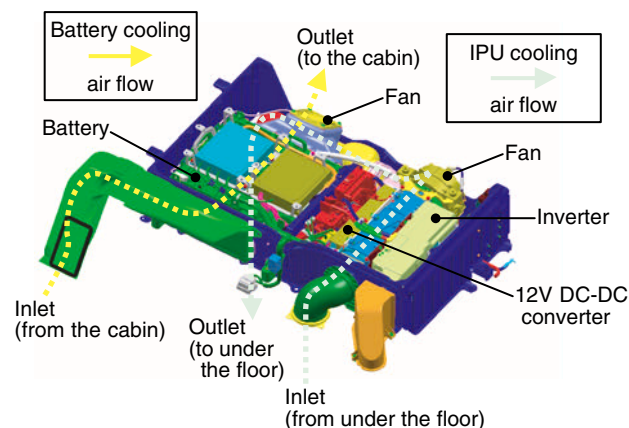


Fig. 15 Cooling air flow in Insight IPU

Fig. 16 に Civic Hybrid の IPU とその冷却経路を示す。Civic Hybrid では IPU をリアシート背面に配置し、冷却風を車内のリアトレイ上に配置された吸気口より取り込みバッテリーを冷却し、その排風を再利用して PCU を冷却しトランクルームに排出するという冷却風の経路を構成した。またバッテリー排気から PCU 入口まではダクトを使用せず IPU ケースの一部を冷却風経路として利用し、部品点数を削減した。この冷却システムの主要な課題を以下に示す。

- 1) バッテリーの冷却排風による PCU の冷却成立性
 - 2) IPU 冷却風による車内騒音
 - 3) バッテリーボックスをリアシート背面に縦置き配置することによる炎天下放置中のバッテリー温度上昇
- ここでは1)の冷却成立性の検証結果を示す。2), 3)については後章で詳細を述べる。

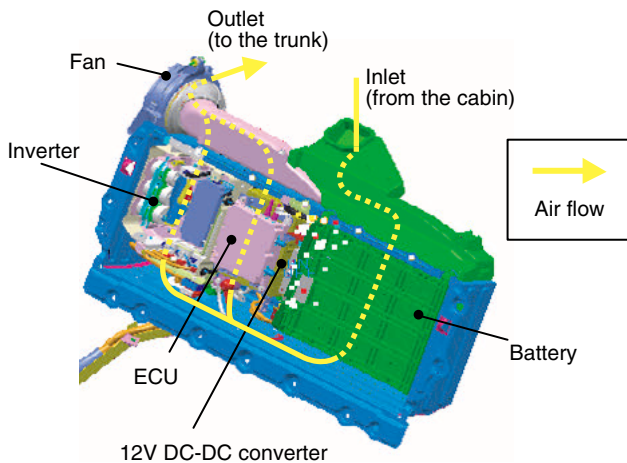


Fig. 16 Cooling air flow in Civic Hybrid IPU

4.1. IPU 冷却風温度の検討

Insight では、車外から PCU 冷却風を取り込んでいるため炎天下等の高温環境を想定し PCU 冷却の最高吸気温度を 60℃と設定していた。Civic Hybrid では吸気温度を低減するために、冷却系を統合し車内吸気であるバッテリーの冷却排風を取り込み、PCU を冷却する配置とした。Civic Hybrid にて車両炎天下放置後の走行時のバッテリー、PCU 吸気温度の推移を Fig. 17 に示す。リアトレイ上の吸気温度(バッテリー吸気温度)は走行開始と共に低下し定常状態で 35

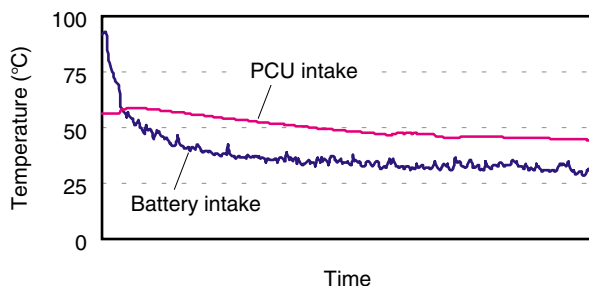


Fig. 17 Cooling air temperature when driving in hot weather

℃程度となる。このエアがバッテリーの冷却により約 50℃まで上昇し PCU の冷却に用いられることになる。これより PCU 冷却風の最大温度を 50℃と設定し冷却成立性の検討を行った。

4.2. 冷却風量の低減検討

バッテリー冷却後のエアを PCU 冷却に利用することで吸入風最高温度を Insight より 10℃低下させ 50℃とすることができた。これと先述の各コンポーネント損失低減によりそれぞれの要求風量をどの程度低減できるかの検討を行った。例としてインバータの温度と冷却風量の関係を示す。Fig. 18 に示す。

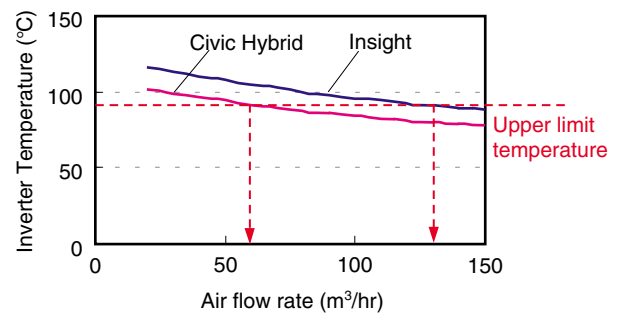


Fig. 18 Characteristics of cooling inverter

インバータの高効率化による最大25%の損失低減と吸気温度低下により、要求風量は 60m³/hr となり従来型に比較して 57%少ない風量での冷却が可能となった。同様に 12V DC-DC コンバータについて検討した結果、要求風量が 60m³/hr となり従来型比 50%減での冷却が可能となった。またバッテリーについては内部抵抗の低減により効率が向上しているものの、車体の重量増加や回生エネルギー増加に伴うバッテリー入出力増により必要冷却風量は 50%増加し 90m³/hr となった。冷却風量低減の結果を Fig. 19 に示す。このグラフに示すように、最大冷却風量目標 90m³/hr に対し、バッテリー、インバータ、12V DC-DC コンバータ全ての最大要求風量が目標以下となった。したがって、車内吸排気に伴う空調負荷の増大や車内騒音等を考慮し設定した最大風量以下にて冷却系内すべてのコンポーネントの冷却を成立させることができた。

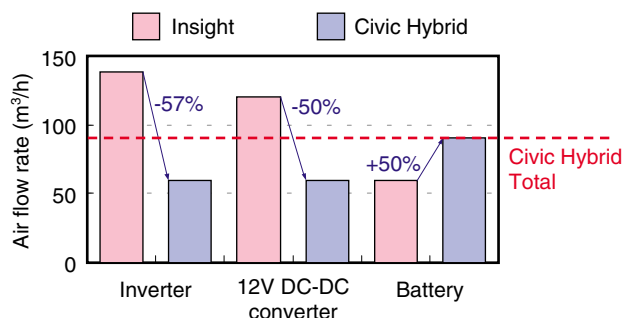


Fig. 19 Air flow rate

このように各コンポーネントの要求風量を目標値以下としたこと、及びそれぞれの機器小型化の結果、冷却経路の一系統化が可能となった。冷却ファンやダクトの部品点数も削減され、冷却系が占めていたIPU体積を従来型に対し62%削減することができた。

5. 冷却ファン騒音低減

IMA 冷却経路の統合化と共に PWM 制御タイプの IPU 冷却ファンを Civic Hybrid 用として新規開発した。このためファンを無段階できめ細かくコントロールすることが可能となった。



Fig. 20 IPU cooling fan

冷却能力を向上させるための簡単な手法は冷却風量を増やすことであるが、そうすると車内吸入風量増加による騒音振動の悪化など車としての商品性低下が懸念される。Civic Hybridでは冷却性能と商品性を高次元でバランスさせるためのファンコントロール手法を新規開発した。ファン駆動デューティ値は、

- 1) バッテリー温度と入出力電流値で決定される値
- 2) バッテリー温度ばらつきにて決定される値

の大きい方を選択し、さらにファン騒音を低減するためにそのときの車速によって決定される上限デューティ値によって制限をかけている。これは車速によって車内暗騒音が変化することを利用し、乗員に感じられるファン騒音を最小限に抑えつつ冷却性能を確保することを目的としている。Civic Hybridではファン騒音設定目標を車内暗騒音より8dB以上低い値としセッティングを行った。車速と騒音レベルをFig. 21に、ファン作動上限デューティグラフをFig. 22に示す。

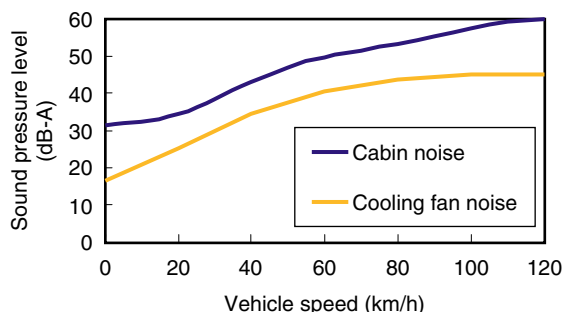


Fig. 21 Cooling fan noise

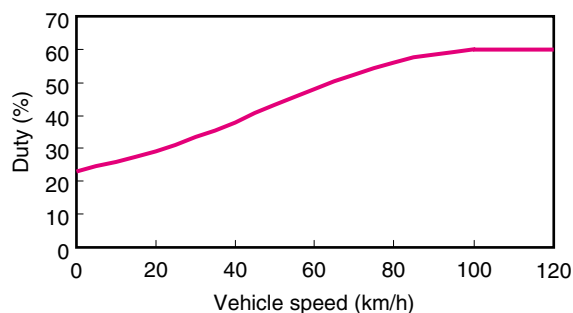


Fig. 22 Cooling fan control

以上の冷却ファン制御を導入することにより、静粛性を確保しつつ必要な冷却性能を満足する冷却システムが可能となった。

6. バッテリーモジュール昇温保護

IPU をリアシート背面に搭載することによりバッテリーボックスは縦置きとなり、車両を炎天下放置したときにボックス上部に位置するバッテリーモジュールが日射により熱せられ、温度が過度に上昇することが課題となる。そこでCivic Hybridではバッテリーボックス周囲に断熱材を敷設することにより、炎天下放置時のバッテリーモジュールが過度に温度上昇することを防いでいる。

主な対策を以下に示す。

- 1) バッテリーボックス周囲への断熱材設置
- 2) 吸気ダクトを発泡樹脂製とし断熱機能を持たせ、内部に熱気遮断ゴム弁を設置

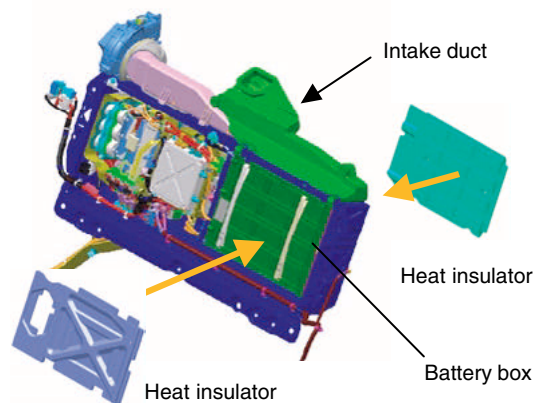


Fig. 23 Heat Insulating device for IMA battery

これらにより、炎天下放置時のバッテリー昇温を約10℃低下し、高温にさらされることを防止している。またこれらは発泡ポリプロピレンビーズ成形品であるため衝撃吸収性に優れ、衝突時のバッテリーボックス保護機能も兼ねている。

7. まとめ

以上のように、各コンポーネントごとに新技術を導入し、効率の向上による発熱量の低減と個々の部品の小型化ができた。特にインバータと 12V DC-DC コンバータの効率向上により、電力負荷が増加したにもかかわらず発熱量が低下し IPU 全体での冷却の簡素化が可能となり、Insight では IMA システムで 2 系統あった冷却通路を 1 系統とすることができた。これらの効果により IPU 体積を Insight に対し 42%削減し IPU をリアシート後方にコンパクトに収納することで従来型セダンと同等の居住性を確保し、トランクスペースの使い勝手を損なうことなく IMA システムが搭載可能となった。

参考文献

- (1) 松木 正人, 若城 輝男, 神山 敏宏, 佐藤 利行, 賀来 嘉昭, 神田 正浩: ハイブリッドカー「Civic Hybrid」用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review Vol.14 No1 April 2001

■ 著 者 ■



相 高 和 彦



細 田 正 晴



野 村 拓 哉